

88

Helen Feldhaus

Klärschlammbehandlungskonzepte für
Industriezonen am Beispiel Vietnams

88

Helen Feldhaus

Klärschlammbehandlungskonzepte für Industriezonen am Beispiel Vietnams

Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft
der Technischen Universität Braunschweig

ISSN 0934-9731

DOI 10.24355/dbbs.084-202103230749-0

Herausgeber:

Gesellschaft zur Förderung des Institutes
für Siedlungswasserwirtschaft an der
Technischen Universität Braunschweig e. V.

Braunschweig 2016



**Technische
Universität
Braunschweig**

Vorwort

Die Vereinten Nationen teilen in ihrem Jahresbericht 2015 mit, dass der Anteil der Weltbevölkerung, der Zugang zu verbesserten sanitären Einrichtungen hat, im Zeitraum 1990 bis 2015 von 54 auf 68 Prozent gestiegen ist. Damit haben seit 1990 2,1 Milliarden Menschen zusätzlich Zugang zu verbesserten sanitären Einrichtungen erhalten und der Anteil der Menschen ohne verbesserte sanitäre Versorgung ist somit um beinahe die Hälfte gesunken. Dennoch haben 2015 immer noch 2,4 Milliarden Menschen keinen Zugang zu verbesserten Sanitäreinrichtungen.

Die Frage der industriellen Abwasserreinigung wird in dem Bericht der Vereinten Nationen überhaupt noch nicht angesprochen. Dabei führt in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern das Bestreben nach mehr Wohlstand und Wirtschaftskraft dazu, dass die Industrialisierung weit fortschreitet und oftmals eine Vielzahl teils großer Industrieregionen ausgewiesen, errichtet und betrieben wird, ohne dass die Probleme der Abwasserbeseitigung sachgerecht gelöst sind. Erst wenn dann in Folge der zunehmenden Industrialisierung ökologische Schäden absehbar sind, bzw. bereits auftreten und/oder die Gesundheit der Bevölkerung beeinträchtigt wird, werden entsprechende technische Einrichtungen zur Abwasserreinigung errichtet.

Bei jeder Abwasserbehandlung fallen jedoch in verschiedenen Behandlungsschritten Schlämme an, deren Menge und Konzentration sehr unterschiedlich sind. Neben den erwarteten Schadstoffen wie organische Verbindungen oder Schwermetalle, z. B. Quecksilber, Blei und anderes, enthalten diese Schlämme aber auch Nährstoffe, die einer entsprechenden nützlichen Verwendung zugeführt werden könnten. Für deutsche und europäische Abwasserverhältnisse liegen Empfehlungen und Bemessungsvorschriften vor, um sowohl den Schlammanfall sachgerecht abzuschätzen, als auch die verschiedensten Verfahren der Schlammbehandlung entsprechend dem Stand der Technik realisieren zu können. Dies ist jedoch für Länder mit anderen klimatischen Bedingungen und anderen soziokulturellen Rahmen- und Randbedingungen äußerst schwierig, da entsprechende Technologien und Schlammmanagementkonzepte notwendig sind, um die geeigneten Verfahrenstechniken auszuwählen bzw. an die lokalen Verhältnisse anzupassen.

Am Beispiel von Industriezonen in Vietnam greift Frau Helen Feldhaus genau diese Fragestellung auf und stellt eine Methodik zur Erarbeitung und Anwendung von Klärschlammkonzepten für Industriezonen auf, die nicht nur für den Einzelfall, sondern auch allgemein unter anderen Randbedingungen gelten soll. Daher widmet sich Frau Feldhaus in ihrer Arbeit zunächst den geografischen, sozioökonomischen, ökologischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie den einzelnen Akteuren und Interessensgruppen, die bei der sachgerechten Themenanalyse und -bearbeitung Berücksichtigung finden müssen. Hierauf aufbauend zeigt Frau Feldhaus wie im Sinne einer Fallstudie, auf Grundlage der Situationsanalyse, relevante Zielkriterien formuliert werden müssen, um

letztendlich die Technikauswahl unter Berücksichtigung der aller Rahmen- und Randbedingungen vornehmen zu können.

Bei ihren Überlegungen schließt Frau Feldhaus auch Technologien ein, wie sie in Mitteleuropa keine praktische Verwendung finden (z. B. Wurmkompostierung), die unter anderen klimatischen bzw. geografischen Randbedingungen durchaus sinnvoll eingesetzt werden können. In der Arbeit sind vor allem Ergebnisse eigener Untersuchungen vor Ort in der Industriezone Tra Noc, Can Tho in Vietnam wiedergegeben, die dann letztendlich auch in ihre Überlegungen zur Durchführung von Nutzwertanalysen einfließen.

Insgesamt hat Frau Feldhaus viele Teilbereiche aufgezeigt, die sowohl für weitere wissenschaftliche als auch praktische Bearbeitung dieses Themas von großem Interesse sind, da zu erwarten ist, dass in naher Zukunft gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern viele Schlammbehandlungsanlagen errichtet und betrieben werden müssen.

Die Arbeit von Frau Feldhaus entstand im Zusammenhang mit dem Forschungsverbund AKIZ (Integriertes Abwasserkonzept für Industriezonen am Beispiel der Industriezone Tra Noc in Vietnam). Abschließend möchte ich auch allen Projektbeteiligten, insbesondere dem Bundesministerium für Forschung und Technologie, für die fachliche, organisatorische und finanzielle Unterstützung danken.

Braunschweig, im Februar 2016

Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl

Kurzfassung

In vielen Entwicklungsländern, wie auch in Vietnam, hat sich in der Bevölkerung noch kein Umweltbewusstsein ausgebildet. Negative Auswirkungen der Umweltverschmutzung sind aber bereits in den Städten sowie ländlichen Bereichen zu erkennen und belasten die Gesundheit der Bevölkerung. Grund dafür ist das schnelle Wirtschaftswachstum, was dazu führt, dass auf dem industriellen Sektor neue Industriezonen erschlossen und Produktionskapazitäten erhöht werden, Industrieunternehmen expandieren und ausländische Direktinvestitionen ansteigen. Die Folge ist eine mangelhafte Infrastruktur, da deren Entwicklung mit der rapiden Entwicklung der Wirtschaft nicht mithalten kann. Dies betrifft im besonderen Maße den abwassertechnischen Bereich, weshalb industriell verschmutztes Abwasser und der anfallende Klärschlamm schwerwiegende Umweltverschmutzungen verursachen.

Nachhaltige Abwasser- und Klärschlammkonzepte bestehen für die vietnamesischen Industriezonen noch nicht, auch wenn diese elementare Bestandteile für eine zukunftsweisende Abwasserbehandlung sind. Deshalb ist in dieser Arbeit eine Methodik erarbeitet worden, die es ermöglicht, nachhaltige Klärschlammbehandlungskonzepte für Industriezonen unter den dortigen Rahmenbedingungen aufzustellen.

Zu Beginn dieser Arbeit sind die Einflüsse der sozialen, kulturellen und politischen Aspekte in einer Situationsanalyse geprüft und die am Entscheidungsprozess beteiligten Akteure untersucht worden. Unter Berücksichtigung der fünf Nachhaltigkeitskriterien sowie den Ergebnissen der Situationsanalyse sind Zielkriterien und Alternativen für die Klärschlammbehandlung und -verwertung der vietnamesischen Industriezonen aufgestellt worden.

Die Rahmenbedingungen der Industriezone Tra Noc, Can Tho, boten die Grundlage für die lokale Anpassung und Überprüfung der bis dahin ermittelten Ergebnisse. Weiterführend wurden dort zur Systemabbildung eigene Versuchsreihen für die Technologien: Kompostierung, Wurmkompostierung, Trockenbeete, Vererdung und anaeroben Stabilisierung durchgeführt, die zur Erstellung von Stoff- und Energiebilanzen für drei Industrieunternehmen und das zu dem Zeitpunkt noch im Bau befindliche Zentralklärwerk dienten. Die abgeleiteten Empfehlungen und Maßnahmen hinsichtlich Bau- und Betriebstechnik dienen zur Unterstützung der späteren Auslegung und Umsetzung der untersuchten Technologievarianten.

Auf Basis der entwickelten Indikatoren, der Situationsanalyse und der eigenen Untersuchungen wurden die ausgewählten Behandlungstechnologien bewertet und für die untersuchten Fallbeispiele geeignete Alternativen ausgewählt. Abschließend werden das Übertragungspotenzial sowie die Anwendungsgrenzen der aufgestellten Vorgehensweise für ein nachhaltiges Klärschlammkonzept dargelegt.

Abstract

In many developing countries, among them Vietnam, no environmental awareness has yet been established in the population. However, negative impacts of environmental pollution can already be identified in cities and rural areas and already show effects on the health of the population. This is due to the rapid economic growth, which leads to new industrial zones, increasing production capacities, expanding industries and rising foreign direct investment. The consequence is an inadequate infrastructure, which cannot keep up with the rapid development of the economy. This applies in particular to the field of wastewater treatment, which is why industrially polluted wastewater and sewage sludge cause serious environmental pollution.

For Vietnamese industrial zones sustainable wastewater and sewage sludge treatment concepts do not exist, although these are the basic components for a future-oriented wastewater treatment. Therefore, in this thesis a methodology has been developed that enables the development of sustainable sludge treatment concepts for industrial zones under existing local conditions.

In the early stages of this research work the effects of social, cultural and political aspects have been examined using a situation analysis and the influence of the decision-making stakeholders has been studied. Taking into consideration the five criteria of sustainability, the results of the situation analysis target criteria and alternatives for sludge treatment and utilization for Vietnamese industrial zones have been established.

Existing local conditions in the industrial zone Tra Noc, Can Tho, provided the basis for local adaption and verification of the obtained results. This was followed by experimental tests to describe the process systems of the technologies composting, vermicomposting, drying beds, humification and anaerobic stabilization. Also mass and energy balances were developed for three companies and for the central wastewater treatment plant, which still had been under construction at the time. Recommendations and measurements for regarding construction and operation were derived and will be used for the dimensioning and implementation of the investigated technologies under local conditions.

Based on the developed indicators, the situation analysis and the experimental tests, the selected treatment technologies were evaluated and suitable alternatives were chosen for the investigated case studies. Finally, the transfer potential and the application limits of the established procedure for a sustainable sludge concept are discussed.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Vorgehensweise	1
1.1	Veranlassung und Zielsetzung	1
1.2	Darstellung der Forschungsdefizite	2
1.3	Erstellung des Arbeitsprogramms	4
2	Grundlagen einer Konzepterstellung	5
2.1	Methodik eines integrierten Klärschlammkonzeptes für vietnamesische Industriezonen.....	6
2.2	Problemidentifikation	11
2.3	Situationsanalyse zur Ermittlung der Ausgangssituation in Vietnam	13
2.3.1	Sozialistische Republik Vietnam	13
2.3.2	Definition Entwicklungs- und Schwellenland	14
2.3.3	Geographische Rahmenbedingungen.....	14
2.3.4	Sozioökonomische Rahmenbedingungen	17
2.3.5	Ökologische Rahmenbedingungen	21
2.3.6	Technische Rahmenbedingungen	23
2.3.7	Gesetzliche Rahmenbedingungen	25
2.3.8	Identifikation der Interessensgruppen	30
2.4	Zusammenfassung der Situationsanalyse und Ableitung der Zielkriterien	36
2.5	Festlegung der Alternativen.....	41
2.6	Auswahl von Varianten für die Behandlung, Verwertung und Entsorgung von Industrieklärschlamm	44
2.6.1	Entstehung und Anfall von Klärschlamm in vietnamesischen Industriezonen	44
2.6.2	Charakterisierung von Industrieklärschlämmen	51
2.6.3	Verwertungs- und Entsorgungsoptionen für Industrieklärschlämme in Vietnam.....	55
2.6.4	Angepasste Technologie für die Industrieklärschlammbehandlung.....	69
2.7	Darstellung von geeigneten Alternativen für vietnamesische Industriezonen.....	78
3	Fallstudie Industriezone Tra Noc, Vietnam	80
3.1	Situationsanalyse für die Industriezone Tra Noc	80
3.1.1	Umfeldanalyse	81

3.1.2	Akteursanalyse	88
3.2	Ableitung relevanter Zielkriterien für die Industriezone Tra Noc	94
3.3	Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc.....	96
3.3.1	Fallbeispiel 1: Fischverarbeitung	96
3.3.2	Fallbeispiel 2: Chitosanherstellung	99
3.3.3	Fallbeispiel 3: Brauerei	101
3.3.4	Fallbeispiel 4: Zentralklärwerk	103
3.4	Überprüfung der Varianten für Behandlung, Verwertung und Entsorgung.....	104
3.4.1	Ermittlung der Klärschlamm-mengen für die Fallbeispiele.....	105
3.4.2	Charakterisierung der Klärschlämme in der Industriezone Tra Noc	106
3.4.3	Anpassung der Entsorgungs- und Verwertungsoptionen	110
4	Material und Methoden	118
4.1	Ansätze zur Beschreibung von Stoffstrom- und Energiebilanzen	118
4.1.1	Bilanzierungsgrundsätze und Bilanzraum	120
4.2	Versuchsaufbauten.....	125
4.2.1	Kompostierung	125
4.2.2	Wurmkompostierung	127
4.2.3	Trockenbeete und Klärschlammvererdung	128
4.2.4	Anaerobe Klärschlammstabilisierung	129
4.3	Physikalische und chemische Analysemethoden	132
5	Systemabbildung ausgewählter Fallbeispiele der Industriezone Tra Noc	134
5.1	Nährstoff- und Schwermetallanalyse	134
5.1.1	Kompostierung	136
5.1.2	Wurmkompostierung	146
5.1.3	Trockenbeete und die Klärschlammvererdung	152
5.1.4	Anaerobe Klärschlammstabilisierung	159
5.2	Energiebilanz.....	170
5.3	Kostenvergleich	181
5.4	Empfehlung und Maßnahmen	187

6	Bewertung der Technologievarianten	190
6.1	Zielsystem und Gewichtung der Indikatoren	190
6.2	Wertsynthese	192
6.3	Berechnung des Nutzwertes	194
6.4	Verifizierung der Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse	197
6.4.1	Bewertung der Fallbeispiele	197
6.4.2	Sensitivitätsanalyse.....	199
7	Alternativenauswahl der Fallbeispiele	201
7.1	Auswahl einer Alternative	201
7.2	Exemplarische Auslegung und Umsetzung der Alternative	202
8	Übertragbarkeit des Konzeptes	206
8.1	Anwendungsgrenzen	206
8.2	Umsetzungsmöglichkeiten	207
9	Zusammenfassung	210
	Literaturverzeichnis	214
	Abkürzungen und Begriffe.....	237
	Abbildungsverzeichnis	241
	Tabellenverzeichnis.....	245
	Anhang	247

1 Veranlassung und Vorgehensweise

1.1 Veranlassung und Zielsetzung

In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern, mit ihren niedrigen Löhnen, und hierzu zählt auch Vietnam, expandiert die Industrie. Industriezonen werden schnell erschlossen, neue Betriebe siedeln sich an oder die bereits existierenden Unternehmen expandieren. Die notwendige begleitende Infrastruktur hält oft nicht Schritt mit dem Tempo der industriellen Entwicklung. Dies betrifft auch den abwassertechnischen Bereich. In Vietnam existieren zwar viele staatlich verwaltete Industriezonen, dies bedeutet aber nicht, dass für die Vielzahl an produzierender Industrie die benötigte Abwasserbehandlungstechnik vorhanden wäre. Auch wenn einige exportierende Industriebetriebe in eine eigene Abwasserreinigung investiert haben, ist die Abwasserreinigung oft unzureichend. Erhebliche Umweltverschmutzungen und -schäden sind die Folge. Verschmutztes Trinkwasser ist eine der gravierendsten Folgen.

Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2000 acht Entwicklungsziele für 2015 festgelegt. Das Ziel, den Anteil an Menschen ohne Zugang zu hygienisch einwandfreiem Trinkwasser zu halbieren, wurde bereits 2010 erreicht (UN 2014). Trotzdem sind noch 748 Millionen Menschen auf nicht einwandfreies Trinkwasser angewiesen, das sie direkt aus Flüssen, Bächen und Teichen entnehmen (UN 2014). Durch den Eintrag ungeklärter Abwässer aufgrund fehlender Kläranlagen sind diese Gewässer oftmals stark verunreinigt und das Wasser umwelt- und gesundheitsgefährdend. Kapitalmangel, fehlende politische Richtlinien, Probleme bei Planung, Bauausführung und Betrieb sind neben Korruption mit dafür verantwortlich, dass immer noch zu wenige Abwasserbehandlungsanlagen in Entwicklungs- und Schwellenländern existieren (WILDERER 2006). ORTH (2006) führt für die Misserfolge in der Umsetzung und Planung von Abwasserbehandlungsanlagen die immer noch nicht ausreichend berücksichtigten Rahmenbedingungen der Entwicklungs- und Schwellenländer an. Hierzu zählt in erster Linie die Abwasserbeschaffenheit, aber auch die Qualifikation des Personals für den nachhaltigen Anlagenbetrieb, die Lebensgewohnheiten oder die religiösen Ansichten.

Die deutsche Abwassertechnik verfügt aufgrund der jahrelangen Erfahrung über viele technisch erprobte, innovative, dezentrale und zentrale Lösungen, die allerdings nicht eins zu eins auf andere Länder, Kulturen, klimatische Bedingungen oder politische Richtlinien übertragen werden können (BISCHOF 2008). In der wirtschaftlichen Zusammenarbeit von Industrie- und Entwicklungsländern hat sich deshalb der Begriff „angepasste Technologie“ entwickelt, der die Adaption an die örtlichen Bedürfnisse und Gegebenheiten ausdrückt (FACH 2013). So ist es beispielsweise notwendig, dass die zum Einsatz kommende Technologie durch das örtliche Personal bedient werden kann, die Kapitalkosten niedrig gehalten und die klimatischen Verhältnisse sowie eine höhere Flexibilität der Technologie berücksichtigt werden. Technik alleine reicht also nicht aus,

um den Randbedingungen der Entwicklungs- und Schwellenländer gerecht zu werden, vielmehr sind die spezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen und in ein Gesamtkonzept zu integrieren (BISCHOF 2008).

Dauerhaft tragfähige Konzepte bestehen für die Industriezonen in Vietnam noch nicht (RUDOLPH & FUHRMANN 2010), werden aber aufgrund der erheblichen Gefährdung für Mensch und Umwelt durch die industriellen Abwässer dringend benötigt. Dies stellt das Industriezonenmanagement vor eine umfangreiche Aufgabe, die oft ohne Hilfe von außen nicht zu bewältigen ist. Zumal bei der Konzepterstellung nicht nur die Abwasserreinigung an sich, sondern auch die dabei entstehenden Reststoffe betrachtet werden müssen. Einer der anfallenden Reststoffe ist Klärschlamm, der sowohl Nähr- wie auch Schadstoffe aus dem industriell anfallenden Abwasser enthält. Die enthaltenen Nährstoffe, insbesondere Phosphor, können ressourcenschonend in der Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden. Die Schadstoffe und die pathogenen Mikroorganismen hingegen müssen reduziert werden, damit eine gefahrlose Entsorgung möglich ist. Ein sachgerechtes Managementkonzept für den anfallenden Klärschlamm hinsichtlich der Behandlung und Verwertung darf deshalb im Gesamtabwasserkonzept der Industriezonen nicht fehlen. Der Einsatz von angepassten Technologien zur Behandlung der anfallenden Industrieklärschlämme unter der Berücksichtigung der örtlichen Rahmenbedingungen ist elementarer Bestandteil für eine zukunftsweisende Abwasserbehandlung.

Ziel der Arbeit ist daher die Erarbeitung und Anwendung einer Methodik zur Erstellung von Klärschlammbehandlungskonzepten für Industriezonen, die nicht nur für den Einzelfall, sondern auch unter anderen Rahmenbedingungen gilt.

Die momentane Situation der Industriezonen in Vietnam dient als Basis zur Erarbeitung der Methodik, die dann anhand einer Fallstudie in der Industriezone Tra Noc angewendet wird. Da grundsätzlich die Methodik für Schlammbehandlungskonzepte gleichermaßen für Entwicklungs- und Industrieland gilt, kommen im experimentellen Teil dieser Arbeit nicht nur in Deutschland bewährte Technologien zur Schlammbehandlung zum Einsatz. Eine zielführende Methodik kann nur aufgestellt werden, wenn auch Technologien angewendet werden, die sich in Vietnam und im asiatischen Raum unter den dortigen Rahmenbedingungen bewährt haben, auch wenn sie in Deutschland und Industrieländern mit abweichenden Randbedingungen ggf. nicht zum Stand der Technik zählen.

1.2 Darstellung der Forschungsdefizite

In der Literatur sind nur wenige Arbeiten zu finden, die sich mit der Konzepterstellung für die bestehende Schlammproblematik in der Abwassertechnik beschäftigen. Eine systematische Methodik für die Behandlung und Verwertung bzw. Entsorgung von Klärschlämmen in Industriezonen liegt bisher noch nicht vor.

Diverse Studien in Entwicklungsländern beschäftigen sich im kommunalen Bereich mit der Behandlung und Entsorgung von Abwasser und Fäkalschlamm (DRÜCKER 2009, GHAZY 2011, HEINSS & MONTANGERO 2003, IPP CONSULT 2008, KLINGEL et al. 2002, SUSANA 2008, JIMENEZ et al. 2004). Dies ist darin begründet, dass die Bevölkerung mit der Problematik dieser Stoffströme und deren negativen Folgen für Mensch und Umwelt täglich konfrontiert wird. Der Handlungsbedarf ist schnell ersichtlich und internationale Organisationen unterstützen die Bevölkerung in Entwicklungsländern tatkräftig in der Lösungsfindung.

Die industrielle Abwasserbehandlung hingegen – einschließlich der Schlammbehandlung und -entsorgung – unterliegt der Verantwortung der Unternehmen, die trotz der erheblichen Umweltprobleme, die die Abwässer und Klärschlämme verursachen, hauptsächlich gewinnorientiert arbeiten. Der Zugang zu den Unternehmen wird internationalen Organisationen (nicht nur in Entwicklungsländern) oftmals verwehrt, die Umweltproblematik nicht erkannt oder verdrängt und ohne den gesetzlichen Rahmen besteht für die Unternehmen kein Zwang, Kapital in eine Abwasser- und Klärschlammbehandlung zu investieren. Trotz der erheblichen Umweltverschmutzung durch die unbehandelten, industriellen Abwässer und Klärschlämme liegt daher der Fokus zumeist auf dem kommunalen Sektor.

Die Erkenntnis, dass Abwasser- und Klärschlammtechnologien, die in Industrieländern Stand der Technik sind, nicht eins zu eins auf Entwicklungsländer zu übertragen sind, ist bereits von zahlreichen Wissenschaftlern untersucht worden (ORTH 2006, BAUERFELD 2012, ORTH et al. 2010, WAGNER & GÜNKEL 2010, DRÜCKER 2009, RUDOLPH & HARBACH 2010). Die Untersuchungen fokussieren sich vielfach auf einen Aspekt der Übertragbarkeit der Technologien, wie Betrieb, Klima oder bemessungstechnische Gesichtspunkte.

Für eine nachhaltige Projektplanung und Umsetzung sollte die Betrachtung jedoch ganzheitlich erfolgen. KLINGEL et al. (2002), FACH (2013), SUSANA (2008) und WHO (2006) zählen zu den Wissenschaftlern und Institutionen, die im Rahmen einer nachhaltigen Abwasser- und Fäkalschlammbehandlung bereits weit mehr als einen Aspekt in den Fokus gesetzt haben. Unbeachtete Aspekte, wie Interessenskonflikte, sozioökonomische sowie institutionelle Kriterien, können dazu beitragen, dass eine langfristige Umsetzung der Projekte nicht erfolgreich ist.

Für die Erstellung eines nachhaltigen Schlammbehandlungskonzeptes für Industriezonen müssen daher die bisherigen Forschungsergebnisse aus der kommunalen Abwasser- und Fäkalschlammbehandlung gezielt durch systematische Untersuchungen zur Industrie-klärschlammbehandlung ergänzt und die Untersuchungsergebnisse in ein ganzheitliches Konzept übertragen und angepasst werden.

1.3 Erstellung des Arbeitsprogramms

Auf Grundlage der dargestellten Ausgangssituation in Vietnam und der bestehenden Forschungsdefizite auf dem Gebiet der industriellen Schlammbehandlung ist das Arbeitsprogramm abgeleitet worden, das eng mit der Methodik einer Konzepterstellung verbunden ist. Diese wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Kapitel 2.1 detaillierter erläutert. Einen ersten Überblick über den Aufbau der vorliegenden Arbeit gibt Abbildung 1-1.

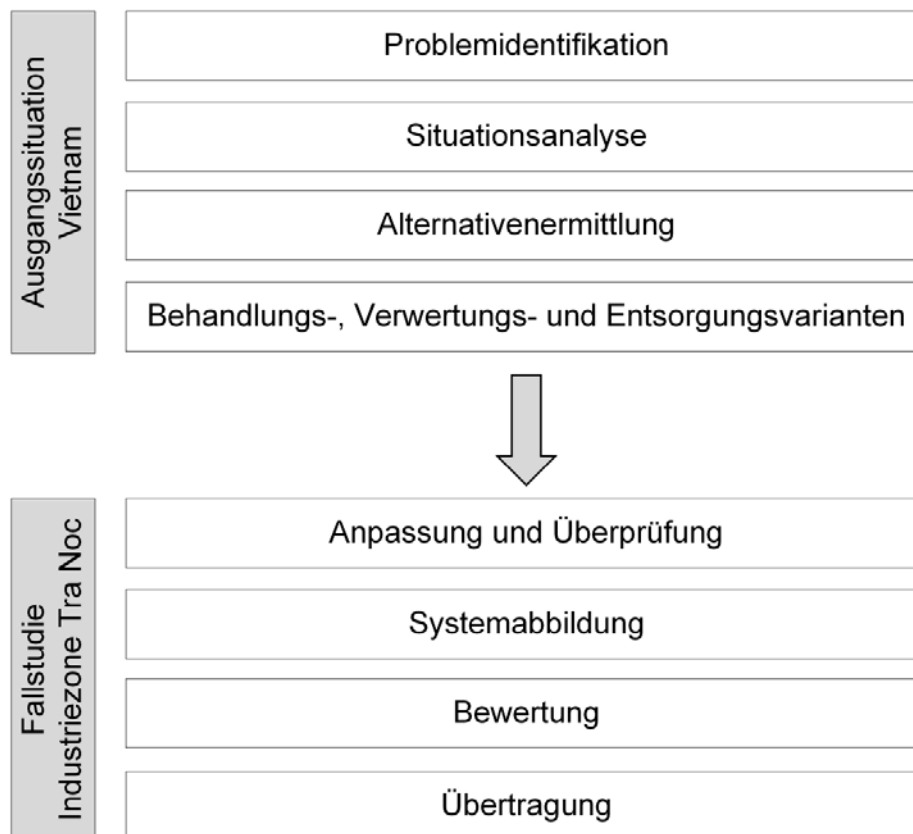


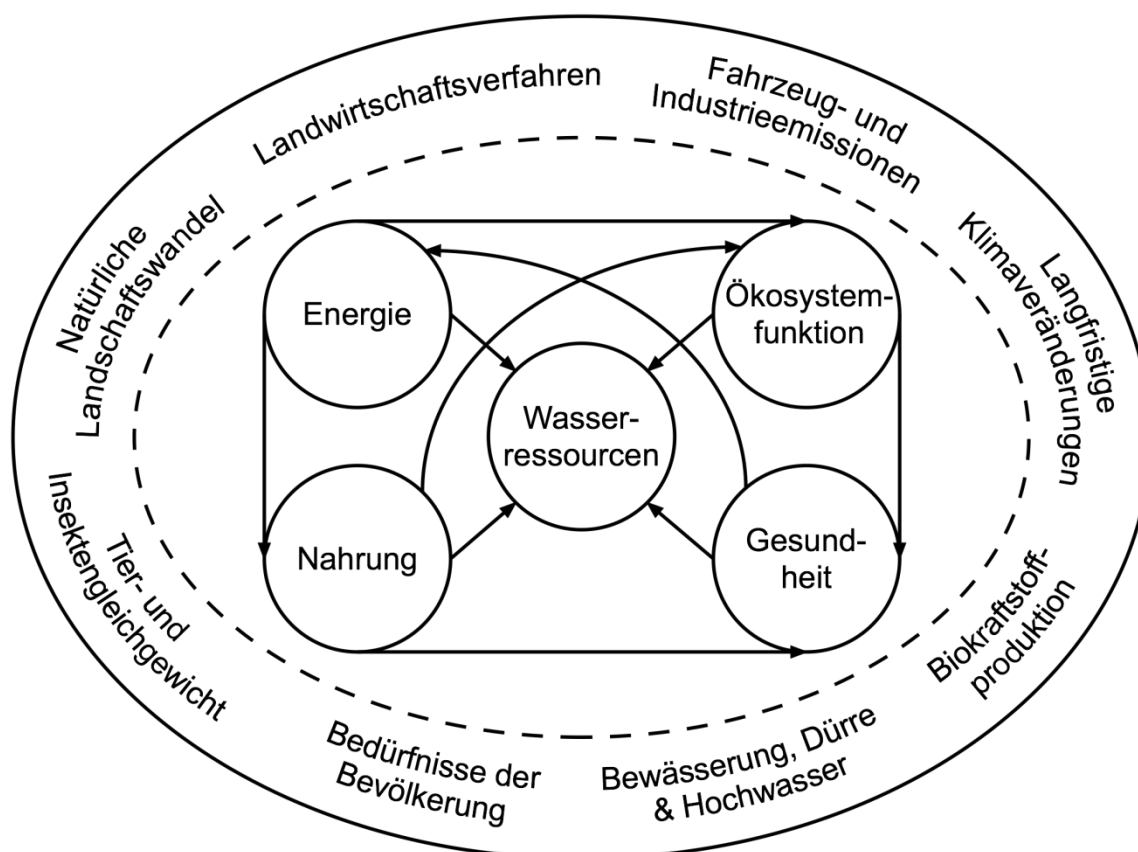
Abbildung 1-1: Aufbau des Arbeitsprogramms

Als exemplarisches Beispiel für die Erstellung eines nachhaltigen Klärschlammkonzeptes dient die Sozialistische Republik Vietnam, in der die fehlende Klärschlammbehandlung und -entsorgung eines der vorherrschenden Umweltprobleme darstellt. Nach der **Problemidentifikation** folgt eine **Situationsanalyse**, die es ermöglicht für Vietnam **Alternativen** für die **Behandlung, Verwertung und Entsorgung** des anfallenden Klärschlammes in den Industriezonen aufzustellen.

Eine Übertragung der für Vietnam praktikablen Alternativen vom Makro- zum Mikromaßstab ist ohne eine **Anpassung und Überprüfung** nicht möglich, da sich zu viele Rahmenbedingungen mit der Hochskalierung verändern. Untersuchungen verschiedener Behandlungstechnologien dienen der **Systemabbildung** der Alternativen für die dezentrale sowie zentrale Klärschlammbehandlung, -verwertung und -entsorgung. Anschließend folgt eine **Bewertung** der vier Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc, die die **Übertragung** des Konzeptes verdeutlichen.

2 Grundlagen einer Konzepterstellung

Wasser ist einer der wichtigsten Faktoren in der Interaktion von Mensch und Natur. Es beeinflusst nicht nur unsere Gesundheit durch die Übertragung von wasserbürtigen Pathogenen, sondern auch unsere Nahrung liefert uns Energie durch Hydropower (anteilig weltweit 10 %) und wirkt auf Flora und Fauna des Ökosystems ein (HOSSAIN 2013). Die Abbildung 2-1 zeigt die Wechselbeziehungen von Wasser mit Umweltfaktoren.



Quelle verändert nach: HOSSAIN (2013)

Abbildung 2-1: Die Wasserressource in Wechselwirkung mit anderen relevanten Einflussfaktoren der Umwelt

Die Wasserinfrastruktur beginnt mit der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung aus natürlichen Wasserquellen, wie Seen, Flüssen, Quellen, Grundwasserleitern und Regenwasserfassungen. Nach der Entnahme und Aufbereitung des Rohwassers wird es in das Trinkwassernetz eingespeist und steht damit Gewerbe, Industrie und Haushalten zur Verfügung. Nach dem Wassergebrauch wird das Abwasser in städtischen Regionen mit Mischkanalisation mit Regenwasser in ein Kanalnetz eingeleitet und in einer Kläranlage gereinigt, bevor es wieder in ein natürliches Gewässer eingeleitet wird. Bei Trennkanalisation wird das Regenwasser separat erfasst und abgeleitet. In ländlichen Regionen oder in Entwicklungsländern, in denen kein Kanalnetz existiert, wird das Abwasser oftmals in einer Klärgrube gespeichert (BURIAN et al. 2013).

Mit Entwicklung des Umweltschutzes im Angesicht wachsender Umweltprobleme wurde in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts der Begriff „nachhaltige Entwick-

lung“ geprägt. Er beschreibt einen Entwicklungsprozess, indem ein umweltverträgliches Gleichgewicht zwischen ökonomischen, sozialen und ökologischen Eigenschaften angestrebt wird (STEG & VLEK 2010). Die Bedürfnisse der heutigen Generation sollen durch zukunftsfähige, dauerhaft tragfähige Entwicklungsprozesse, ökonomische Sicherheit und soziale Gerechtigkeit weltweit auf lange Sicht stabilisiert werden ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eignen Bedürfnisse zu befriedigen (HERBST 2008, UN 1987).

Es reicht also nicht, die Umweltprobleme ausschließlich nach ökonomischen Gesichtspunkten zu betrachten. Nur nachhaltige Problemlösungen, bei denen die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekte betrachtet werden, sind zukunftsfähig. Zur Erstellung eines nachhaltigen Konzeptes für den bei der Abwassereinigung anfallenden Industrieklärschlamm aus vietnamesischen Industriezonen sind demnach die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren Technologie, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik zu integrieren.

2.1 Methodik eines integrierten Klärschlammkonzeptes für vietnamesische Industriezonen

Für die Erstellung eines integrierten und nachhaltigen Klärschlammkonzeptes ist eine Problemidentifikation mit anschließender Situationsanalyse der erste Schritt. Veränderungen in der Umwelt sowie die Ursachen und Folgen des anfallenden, aber unbehandelten Klärschlammes müssen wahrgenommen und als Umweltproblem identifiziert werden (siehe Kapitel 2.2). Hier entstehen erste definitorische Herausforderungen, denn die Abgrenzung des Begriffs „Umweltproblem“ erscheint bisher unzureichend (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002).

HIRSCH (1995) beispielsweise definiert Umweltprobleme als „anthropogene Veränderungen in der Natur, die negativ bewertet werden, unter Einschluß ihrer anthropogenen Ursachen und der Veränderung dieser Ursachen (nachhaltige Entwicklung).“

Ob Veränderungen in der Natur negativ bewertet werden, hängt somit vor allem von den Wertvorstellungen und dem allgemeinen Kenntnisstand in der Gesellschaft ab, welche besonders durch die Medien und die Regierung in Form von Gesetzestexten geprägt werden (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, KLINGEL et al. 2001, KLINGEL et al. 2002). Die Grundstruktur für einen Problemlösezyklus und damit auch Basis für ein nachhaltiges Konzept ist laut FRISCHKNECHT & SCHMIED (2002) die Ermittlung des Ist-Zustandes als Ausgangspunkt und die Festlegung eines anzustrebenden Zielzustandes. Es folgt die Lösungssuche, das Entwickeln verschiedener Lösungsansätze, sowie die Auswahl und Umsetzung der geeignetsten Lösungsvariante. Angepasst an die spezielle Situation und unter Berücksichtigung der vorab beschriebenen Einflussfaktoren ergibt sich für das nachhaltige Klärschlammkonzept für vietnamesische Industriezonen eine komple-

xere Vorgehensweise als die von FRISCHKNECHT & SCHMIED (2002) beschriebene Grundstruktur.

1. *Problemidentifikation*

Am Beginn der Konzepterstellung steht die **Problemidentifikation**: Wahrnehmen des Umweltproblems, Handlungsbedarf erkennen, Abgrenzen der zu betrachtenden Situation und Erstellen einer ganzheitlichen Sicht des Umweltproblems aus unterschiedlichen Perspektiven.

2. *Situationsanalyse*

Um die Ziele und relevanten Kriterien für die Lösungsansätze aufzustellen, ist es wichtig, die vorliegende Situation durchgängig zu verstehen. Es geht hierbei nicht nur um technische Details, sondern vielmehr um ein ganzheitliches Bild der Situation mit allen relevanten Gesichtspunkten und Beziehungen. Dies legt den Rahmen fest, in dem Lösungsansätze realisiert werden können (KLINGEL et al. 2002).

2a. *Umfeldanalyse*

Erst das Zusammentragen der erforderlichen Rahmenbedingungen zu Geographie, Recht, Ökonomie, Ökologie, Soziologie und Technologie macht es möglich nachhaltige Lösungsalternativen innerhalb des Handlungsrahmens zu erarbeiten (FACH 2013). **Die institutionellen, administrativen und politischen Konditionen** des Umfeldes haben nicht nur einen großen unbewussten Einfluss auf die Bevölkerung, sondern wirken auch auf die Auslegung und Entwicklung der Schlammbehandlungsanlage und die Entsorgungsoptionen ein. **Die Topographie, Geologie und das vorherrschende Klima** können Umweltprobleme bewirken oder verstärken. Gleichzeitig beeinflussen sie die Umsetzbarkeit der technischen und organisatorischen Lösungsansätze (KLINGEL et al. 2002). Auch **die Religion, die kulturellen Normen und die sozioökonomischen Aspekte** wirken auf die Meinungsbildung ein. Sie geben zusätzlich Informationen über das Freizeitverhalten, die Arbeitsmentalität sowie die Fähigkeiten und Bereitschaft der Bevölkerung bei der Problemlösung sowie der Umsetzung mitzuwirken oder erarbeitete Lösungsansätze zu akzeptieren (KLINGEL et al. 2002, WIENEKE 2005, AD HOC 2014). **Die Kommunikation des Zusammenwirkens von ökologischen Problemen und gesundheitlichen Konsequenzen** verdeutlicht die Notwendigkeit zu handeln, stärkt das Verständnis in der Bevölkerung und steigert die Motivation den betroffenen Personen bei der Lösungserarbeitung mitzuwirken. **Die Analyse der wirtschaftlichen Situation** zeigt, welches die relevanten Wirtschaftssektoren und wie die Beschäftigtenzahlen verteilt sind, gibt Aufschluss über die Kredit- und Investitionsbereitschaft der Interessensgruppen oder die finanziellen Möglichkeiten für den Bau, Betrieb und die Instandhaltung der technischen Lösungen.

2b. Identifikation der Interessensgruppen

Da Umweltprobleme gesellschaftlich verursacht werden und durch nachhaltige Lösungsansätze sowie Entwicklungen letztlich gesellschaftlich gelöst werden müssen, ist es wichtig in die Konzepterstellung die Sichtweisen, die in den **Interessensgruppen** über das Umweltproblem bestehen, in die Problemlösung einzubeziehen (HIRSCH 1995). Dies kann nicht nur in der Problemidentifikation von Bedeutung sein. Im weiteren Entwicklungsprozess und der späteren Umsetzung wird aufeinander abgestimmtes Handeln der Interessensgruppen, die über Stoff-, Energie-, Geld- oder Informationsflüsse miteinander verbunden sind (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002), ebenso erforderlich sein.

Die Interessensgruppen geben Auskunft über ihre Handlungsmöglichkeiten und -grenzen, identifizieren die Handlungsrestriktionen und ermöglichen es, Strategien zur Überwindung dieser Restriktionen zu entwickeln (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002). Außerdem wird ein Lösungsansatz am besten funktionieren, wenn alle Interessensgruppen mit der Lösung zufrieden sind, einen Nutzen für sich aus der Umsetzung ziehen können oder diese einen Anreiz bietet, der zur Umsetzung motiviert (KLINGEL et al. 2002). Es ist somit unabdingbar, die Vorstellungen, Bedürfnisse, Interessen und die persönliche Situation aller Beteiligten zu berücksichtigen (KLINGEL et al. 2002).

2c. Zielsetzung und Festlegung der relevanten Kriterien

Die Quelle für die Zielsetzung des Konzeptes ist die Situationsanalyse (AD HOC 2014), die durch die vorherrschenden Rahmenbedingungen sowie die Meinungen, Wünsche und Vorstellungen der Interessensgruppen zu einer ersten Zielformulierung führt (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, KLINGEL et al. 2002). Im Laufe der Konzeptarbeit können die Zielformulierungen immer wieder angepasst, konkretisiert sowie erweitert werden und zur Beurteilung und Evaluierung der Lösungsansätze beitragen.

Die relevanten Kriterien sollen dabei die realen Informationen sowie Zusammenhänge verdichtet und reduziert darstellen (SCHUH 2001). Um bei neuen Sanitärsystemen den Nachhaltigkeitsgedanken zu integrieren, hat SuSANA (2008) fünf Kategorien entwickelt, die sich auch auf ein nachhaltiges Schlammkonzeptes übertragen lassen:

1) Gesundheit und Hygiene

Umfasst die Risiken, die durch den Kontakt mit Krankheitserregern und Risikostoffen die Gesundheit gefährden können sowie Hygiene, Ernährung und Verbesserung der Lebensbedingungen

2) Umwelt und Ressourcen

Umfasst Energie, Wasser und andere natürliche Ressourcen, die für Bau, Betrieb und Instandhaltung benötigt werden sowie die durch den Betrieb freigesetzten Emissionen, den Grad des Recyclings, der praktizierten Verwertung und die Auswirkungen und Schonung von nicht erneuerbaren Ressourcen

3) Technologie und Betrieb

Umfasst die Funktionalität, die Möglichkeit der eigenständigen Bauplanung und -konstruktion, Betrieb und Instandhaltung sowie die Robustheit des Systems bei Stromausfällen, Überschwemmungen u.a. und die Flexibilität sowie Anpassungsfähigkeit der technischen Komponenten an bereits vorhandene Infrastruktur oder sozioökonomische Veränderungen

4) Finanzielle und ökonomische Kriterien

Umfasst die Fähigkeit der Beteiligten für Bau, Betrieb, Instandhaltung und Erneuerungen aufzukommen (direkte Kosten) und berücksichtigt den direkten Nutzen durch z. B. zurückgewonnene Produkte (Bodenverbesserer, Dünger, Energie und Wasser) ebenso wie die externen Kosten, Umweltverschmutzung und Gesundheitsrisiken, und der indirekte Nutzen wie Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität, Schaffung von Arbeitsplätzen, Verbesserung der Gesundheit und Reduzierung von Umweltrisiken

5) Soziokulturelle und institutionelle Kriterien

Umfasst die soziokulturelle Akzeptanz und Eignung des Systems in Bezug auf Bedienungsfreundlichkeit, soziale Wahrnehmung, Vereinbarkeit mit gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die stabilen und effizienten institutionellen Strukturen

3. Festlegung von Alternativen

Die Alternativen werden aus der bisherigen Situationsanalyse abgeleitet (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, KLINGEL et al. 2002). Sollen **Alternativen für die Schlammbehandlung** aufgestellt werden, müssen Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Verwertungsoptionen zusammen betrachtet werden, denn nur so kann eine optimale Nutzung der Ressourcen, wie Kapital, Rohstoffe, Energie und Arbeitskraft mit den Anforderungen an die Behandlungstechnologie kombiniert werden (SHAMMAS & WANG 2008).

4. Auswahl von Varianten für Behandlung, Verwertung und Entsorgung

Bevor konkrete Lösungsansätze aufgestellt werden können, ist aus der Vielzahl von Behandlungsmethoden eine Auswahl zu treffen, die den vorher festgelegten Kriterien gerecht wird. Dies erfolgt durch die nachfolgend aufgelisteten Ermittlungsschritte.

4a. Entstehung und Anfall des Industrieklärschlammes

Ohne die **Ermittlung der Klärschlammmenge** ist eine Dimensionierung und Auslegung der Anlagenteile nicht möglich (KLINGEL et al. 2002). Dies ist allerdings erst zu einem späteren Zeitpunkt von Interesse. An dieser Stelle wird die Klärschlammmenge benötigt, um eine passende Behandlungstechnologie auszuwählen.

4b. Charakterisierung der anfallenden Industrieklärschlämme

Als zweiter Schritt erfolgt die **Charakterisierung des anfallenden Industrieklärschlamm**s anhand von physikalischen, chemischen und biologischen Parametern. Bereits die Klärschlammarten, die nach ihrem Anfallort unterschieden werden, weisen unterschiedliche Charakteristika auf. Die Abwasserzusammensetzung, die Abwassermenge, die eingesetzten Abwasserreinigungstechniken und deren Effektivität wirken sich auf die Abwasserinhaltsstoffe aus. Die Kenntnis der Klärschlammzusammensetzung ist die Basis für die Auswahl und Aufstellung der im nächsten Schritt folgenden realisierbaren Verwertungs- und Entsorgungsoptionen. So können bestimmte Verwertungswege aufgrund von Inhaltsstoffen, wie z. B. Schwermetallen, bereits in der konzeptionellen Phase ausgeschlossen werden.

4c. Ermittlung der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen

Aus den **umsetzbaren Verwertungs- und Entsorgungsoptionen** ergeben sich die möglichen Behandlungstechnologien, so dass die Entscheidung hierüber erst getroffen werden kann, wenn die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen spezifiziert worden sind (SHAMMAS & WANG 2008). Oftmals eignen sich mehrere Optionen zur Verwertung und Entsorgung, die später in Kombination mit den Behandlungstechnologien die Lösungsansätze bilden.

4d. Auswahl der Technologievarianten

Die **Technologievarianten** werden auf Basis der ausgewählten Verwertungs- und Entsorgungsoptionen betrachtet. Welche Behandlungsschritte sind demnach notwendig, damit der Klärschlamm nach den aufgestellten Optionen verwertet oder entsorgt werden kann? Entscheidungshilfen zur Reduzierung der Technologievarianten können Analysen (Boden, Geologie oder Grundwasser) der potentiellen Verwertungsorte, lokale Umfragen zur Ermittlung der Marktfähigkeit der behandelten Klärschlämme, Literaturrecherchen anhand der vorliegenden Kläranlagendaten oder Massenbilanzen sein (SHAMMAS & WANG 2008).

5. Systemabbildung durch Massenbilanzen

Um aus den ausgewählten Technologien die geeignetste Technologievariante auszuwählen, können als eine Auswahlmethode **Massenbilanzen bzw. Stoffstromanalysen** durchgeführt werden. Sie erfassen, beschreiben und interpretieren den Stoffhaushalt eines vorab definierten Systemraumes innerhalb einer bestimmten Zeitperiode (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, BACCINI & BRUNNER 2012). Die Datenerfassung, die für die Stoffstromanalyse notwendig ist, ermöglicht die Abbildung von Elementen, Stoffen oder auch Energie, die als Grundlage für die zu entwickelnden Lösungsansätze in Bezug auf die Umweltbelastung oder den Ressourcenverbrauch dient (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002).

6. *Entwicklung von Empfehlungen und Maßnahmen*

Durch die Situationsanalyse und die Abbildung der Massenbilanzen können die Systemaspekte und Systemgefüge deutlicher dargestellt werden. Der zu erreichende Zielzustand kann nun durch die Entwicklung von **Empfehlungen** und den damit verbundenen, zur Umsetzung notwendigen **Maßnahmen** konkretisiert werden.

7. *Bewertung der Technologievarianten und Auswahl einer Alternative*

Da zumeist mehrere Technologievarianten anhand der Situationsanalyse und Massenbilanzen weiter verfolgt werden, ist das Ziel der Bewertungsmethodik aus den Lösungsansätzen und deren Maßnahmen den Geeignetsten auszuwählen. Für die Bewertung werden die vorher aufgestellten fünf Nachhaltigkeitskriterien (SuSANA 2008) herangezogen, die es erlauben die Argumente sinnvoll einander gegenüberzustellen und eine Übersicht über die Entscheidungssituation zu schaffen (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, SuSANA 2008, KLINGEL et al. 2002). Der Entscheidungsprozess soll durch das Bewertungsverfahren transparent sowie nachvollziehbar gemacht werden, so dass die Entscheidung auf einer rationalen Basis getroffen werden kann. Gerade **multikriterielle Bewertungsverfahren** eignen sich für die Auswahl einer geeigneten Alternative, dies liegt zum einen an der Transparenz und Nachvollziehbarkeit, aber auch an der Diskussionsebene, die für alle Beteiligten geschaffen wird, sowie den Wertvorstellungen der Interessensgruppen, die mit in den Entscheidungsprozess einfließen, und schließlich der deutlichen Rangierung der Alternativen, die eine rein intuitive und willkürliche Entscheidung verhindern (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, KLINGEL et al. 2002).

8. *Auslegung und Umsetzung der Alternative*

Ist einmal die Entscheidung für eine Alternative getroffen worden, kann mit der Planung und Auslegung der notwendigen Anlagenteile durch ein Ingenieurbüro begonnen werden. Nach der Detailplanung kann durch geeignete Baufirmen mit der Umsetzung der Klärschlammbehandlungsanlage begonnen werden.

2.2 Problemidentifikation

Ein Umweltproblem kann häufig erst identifiziert werden, wenn Überwachungsbehörden oder aber nachgelagert die Bevölkerung eine Veränderung in der Natur wahrnehmen und diese negativ bewerten. Dabei ist ein Zusammenhang mit individuellen sowie kollektiven Dispositionen sowie dem allgemeinen Kenntnisstand in der Gesellschaft und nicht zuletzt der bestehenden Institutionen gegeben, weshalb auch die Medien ein wichtiger Faktor in diesem Prozess sind (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002).

In den vietnamesischen Tageszeitungen werden die Veränderungen in der Umwelt durch industrielle Abwässer und die illegale Einleitung in Gewässer allmählich präsenter und tragen zur Meinungsbildung der Bevölkerung, aber auch zum Handlungsdruck auf

die Regierung bei. In Abbildung 2-2 sind Schlagzeilen zusammengetragen, die sowohl verdeutlichen, dass die Verschmutzungen durch industrielle Abwässer als Umweltproblem wahrgenommen werden, als auch, dass die Regierung bereits Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung und Reduzierung der Umweltprobleme ergriffen hat.



Quelle: VD OFFICE (2013)

Abbildung 2-2: Schlagzeilen verschiedener vietnamesischer Zeitungsartikel

So berichtet etwa die Zeitung NHAN DAN ONLINE (2014) von sozioökonomischen Entwicklungsstrategien der Regierung, die das Thema Nachhaltigkeit beinhalten. Die starke Umweltverschmutzung durch industrielle Abwässer und ihre Folgen für die Natur sowie Gesundheit sind somit schon länger in den Medien präsent. Hierzu nimmt auch Oberst Doan Huu Chau, Leiter der Umweltbehörde, in einem Interview mit Vietnam News Stellung. Seine Einheit PC49 wurde gegründet, um die Umwelt zu schützen sowie zur Einhaltung der Umweltgesetze beizutragen, wenngleich diese seiner Aussage nach aufgrund der erheblichen Gesetzesverstöße oftmals noch lückenhaft sind (VNS 2014).

Immerhin zeigt sich die Regierung so länger problembewusst und verabschiedet Gesetze und Verordnungen, wie den Circular 08/2009/TT-BTNMT, der in Artikel 5 ein Zentralklärwerk für alle Industriezonen vorschreibt. Erst durch den Bau und Betrieb von kommunalen und industriellen Abwasserreinigungsanlagen ist der bei der Abwasserreinigung anfallende Klärschlamm als Umweltproblem offenbart worden. MoNRE (2012) berichtet beispielsweise von der Kläranlage Binh Hung in Ho Chi Minh Stadt, die aufgrund von fehlenden Deponiekapazitäten ein Schlamm Entsorgungsproblem, aber keine Lösungsansätze für die Behandlung und Verwertung vorzuweisen hat.

Laut EUWID WASSER UND ABWASSER (2012) sollen für eine bessere Ver- und Entsorgung im Wasser- und Abwasserbereich über zwölf Milliarden US-Dollar investiert werden. Dies allerdings größtenteils im industriellen Sektor, da die unbehandelten industriellen Abwässer und Klärschlämme insbesondere hier große Umweltprobleme verursachen.

Im Hinblick auf die Problemidentifizierung wird deutlich, dass in Vietnam zwei schwerwiegende Probleme vorliegen:

Problem 1: Starke Umweltverschmutzung durch nicht ausreichend oder gar nicht geklärte industrielle Abwässer und unbehandelte Industrieklärschlämme

Problem 2: Fehlende Behandlung und Entsorgung von Industrieklärschlämmen

Es besteht somit ein großer Handlungsbedarf für die Regierung, die negativen Umwelteinflüsse des unbehandelten Klärschlammes mit geeigneten Behandlungskonzepten zu reduzieren.

Nachfolgend wird mit einer Situationsanalyse die Grundlage für die Entwicklung von Alternativen für vietnamesische Industriezonen erarbeitet.

2.3 Situationsanalyse zur Ermittlung der Ausgangssituation in Vietnam

Eine Konzepterstellung folgt einer logisch aufgebauten Struktur, bei der sichergestellt sein sollte, dass die vorliegende Situation und das Umweltproblem auf verschiedenen Ebenen (geographisch, sozioökonomisch, ökologisch, technisch, juristisch) betrachtet, Einflussfaktoren und Zusammenhänge ermittelt und die Interessensgruppen untersucht werden. Die Situationsanalyse umfasst diese Arbeitsschritte und ermöglicht die Ausarbeitung der weiteren Vorgehensweise, in dem sie die Zielsuche und Bearbeitung der Lösungsansätze vereinfacht (Ad Hoc 2014).

2.3.1 Sozialistische Republik Vietnam

Vietnam zählt zu den südostasiatischen Staaten, die durch eine große ethnische, religiöse und soziokulturelle Vielfalt geprägt sind. Die politischen decken sich oft nicht mit den bevölkerungs- und kulturgeographischen Grenzen, weshalb in Vietnam verschiedene Minderheiten (54 ethnische Gruppen, AUSWÄRTIGES AMT 2014) das Bild prägen. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde das Land in ein kommunistisches Nord- und ein westlich orientiertes Südvietnam geteilt. Erst nach dem Vietnamkrieg kam es zu einer Wiedervereinigung der beiden Staatenteile zur „Sozialistischen Republik Vietnam“, die auch heute noch besteht (VORLAUFER 2011). Im politischen Einparteiensystem Vietnams spielt die Kommunistische Partei eine zentrale Rolle – und zwar sowohl in der Legislative als auch in der Exekutive und der Gesellschaft (ARNOLD 2010). Durch die sozialistische Staatsform entstand eine enge Bindung mit der früheren Deutschen

Demokratischen Republik. Bis 1989 absolvierten rund 100.000 Vietnamesen ihre Ausbildung an verschiedenen deutschen Universitäten. Heute sind diese Vietnamesen häufig in Ministerien und Regierungsgremien zu finden und sorgen unterstützt durch die wichtige Handelsbeziehung beider Länder für eine enge Bindung Vietnams an Deutschland (LAN 2013).

2.3.2 Definition Entwicklungs- und Schwellenland

Zwar herrscht keine eindeutige Definition der Begriffe, allerdings gelten als Entwicklungsländer, diejenigen Staaten, die wirtschaftlich und gesellschaftlich im Vergleich zu westlichen Industrieländern einen erheblichen Rückstand bei den Lebensbedingungen aufweisen. Ursachen für die unzureichenden Lebensbedingungen in Entwicklungsländern sind oftmals natürliche Faktoren wie Klima, fehlende Bodenschätze, nicht vorhandene Infrastruktur, Kapitalmangel und Mangel an qualifizierten Fachkräften (FACH 2013). Die Definitionsansätze zur Bewertung des Entwicklungsstandes der Weltbank, des Ausschusses für Entwicklungshilfe der OECD (DAC, Development Assistance Committee) und des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen sind die bedeutungsvollsten, variieren aber bezüglich der herangezogenen Kriterien und Merkmale.

Gemäß den Definitionsansätzen der verschiedenen Organisationen und festgelegten Kriterien gehört Vietnam nicht mehr in die Kategorie „Entwicklungsland mit geringem Einkommen“, sondern zählt bereits zu den Ländern mit mittlerem Einkommen. Hier ist wohl eher der Begriff Schwellenland zu wählen, der ein Land beschreibt, welches sich durch ein hohes Wirtschaftswachstum auszeichnet. HAMAGUCHI & ISHIZUKA (2012) sowie DINH & MISHRA (2013) bestätigen dies durch die Verdoppelung des Pro-Kopf-Einkommens seit den 1990ern und einer jährlichen Wachstumsrate von über 7 %. Fortschritte in der Industrialisierung können auch im sanitären Bereich festgestellt werden. Im ländlichen Raum, beispielsweise, sind mehr Menschen an hygienisch einwandfreiem Trinkwasser und sanitären Anlagen angeschlossen worden, wenn auch die Abwasserreinigungs- und Schlammbehandlungsanlagen noch nicht in ausreichender Zahl vorhanden sind.

Da für den Begriff Schwellenland in der Literatur keine genaue Abgrenzung vorliegt, wird in den nachfolgenden Kapiteln weiterhin der Begriff Entwicklungsland benutzt, auch wenn einige Literaturquellen Vietnam als eins der schnell wachsendsten Schwellenländer betiteln (HAMAGUCHI & ISHIZUKA 2012).

2.3.3 Geographische Rahmenbedingungen

Geographische Lage

Geografisch erstreckt sich Vietnam in einer Nord-Süd-Ausrichtung von 103-109° östlicher Länge und 8-23° nördlicher Breite. Die Indochinesische Halbinsel, auf der Vietnam

liegt, erstreckt sich vom Golf von Tonkin über das südchinesische Meer bis hin zum Golf von Thailand und bietet eine Küstenlänge von 3.444 km ohne die vietnamesischen Inseln. Vom Mekong Delta bis zur berühmten Halong-Bucht am Golf von Tonkin sind es fast 1.700 km mit einer Fläche von 332.800 km². Im Norden grenzt Vietnam an die Volksrepublik China, im Westen an die Volksrepublik Laos, während im Süden das Königreich Kambodscha zu den Nachbarstaaten zählt. Als Hauptstadt des Landes wurde nach der Wiedervereinigung Hanoi ernannt. Gemeinsam mit Ho Chi Minh Stadt (ehemals Saigon) im Süden ist dies die wichtigste Wirtschaftsregion des Landes. Die Abbildung 2-3 zeigt die Geografische Lage in Südostasien.



Quelle: CIA (2014)

Abbildung 2-3: Geografische Lage der Sozialistischen Republik Vietnam

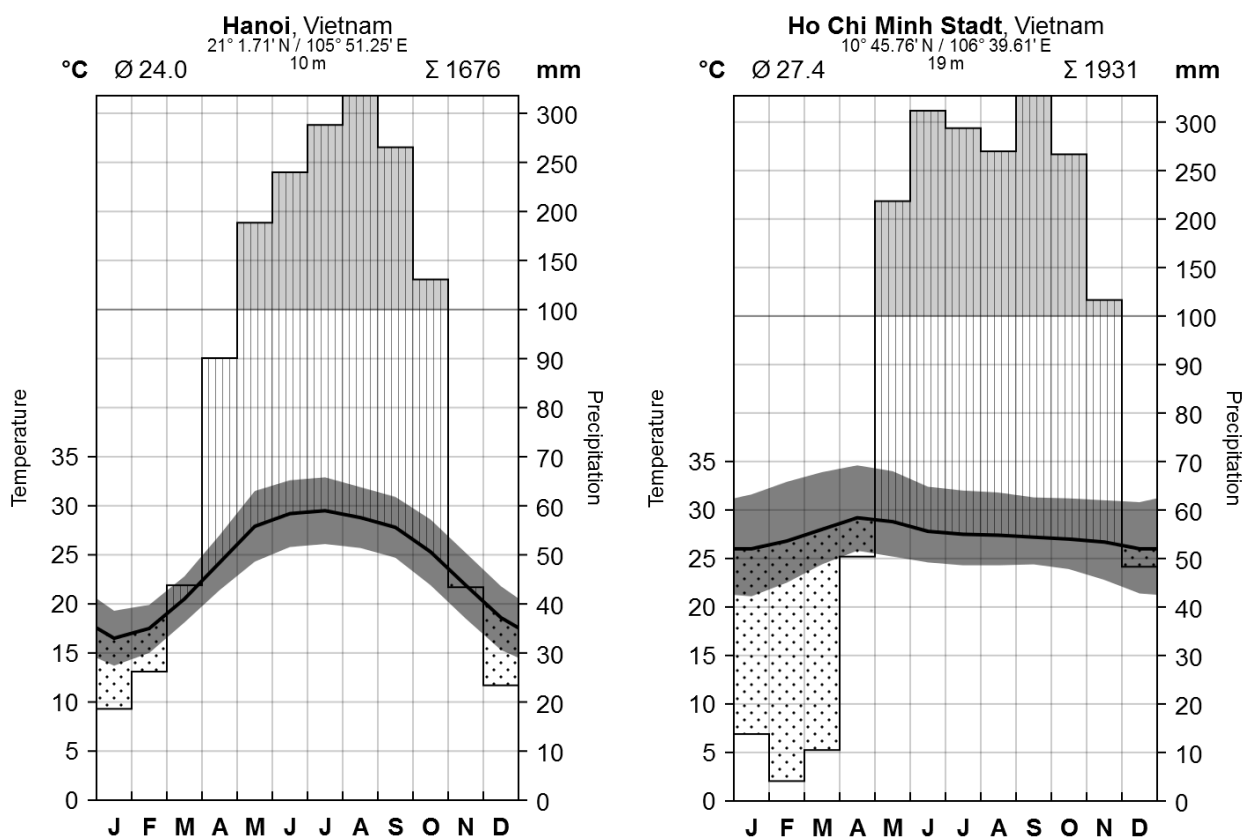
Klima

Aufgrund seiner südostasiatischen Lage liegt Vietnam nach den Kriterien der Jahreszeitenklimate von TROLL & PAFFEN (1964) in der Tropenzone, die mit sechs Jahreszeitenklimaten ausgezeichnet wird. Doch durch die große Nord-Südausdehnung weicht der Norden Vietnams hiervon ab, denn dort dominiert das Klima der warmgemäßigten sommerfeuchten Subtropenzone, wie die Abbildung 2-4 zeigt.

Während die Temperaturen in Ho Chi Minh Stadt annähernd das ganze Jahr konstant zwischen 26-28°C liegen, treten in Hanoi (Durchschnittstemperatur 24°C) zwei Jahreszeiten auf. Von November bis April liegen die Temperaturen in Nordvietnam oftmals unter 20°C, in der heißen Jahreszeit (Mai bis Oktober) hingegen sind sie vergleichbar mit dem im Süden herrschenden Tropenklima und erreichen Maximalwerte bis über 37°C. Aufgrund der äquatorialen Nähe gibt es eine annähernde Tag- und Nachtgleiche mit kurzen Dämmerungsphasen. Dies wird auch als Tageszeitenklima bezeichnet, da die

Amplitude eines Tages größer ist als die des Jahres.

Vietnam wird durch Monsune geprägt, die klimabestimmend sind und durch die Verteilung von Land und Wasserflächen sowie dem wechselnden Sonnenstand die Luftdruckverhältnisse beeinflussen. Dieses Zirkulationssystem bewirkt eine winterliche Trocken- und eine sommerliche Regenzeit, weshalb die höchsten Niederschläge in Ho Chi Minh Stadt von Mai bis Oktober fallen. Im nördlichen Hanoi ist die Regenzeit auf Mai bis September begrenzt. Durch den ganzjährigen Einfluss der Innertropischen Konvergenzzone fallen aber auch in anderen Monaten Niederschläge (VORLAUFER 2011). Jahresdurchschnittliche Niederschlagsmengen liegen bei 1676 mm im Norden, 1931 mm im Süden und begünstigen die Landwirtschaft.



Quelle: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2014)

Abbildung 2-4: Klimadiagramme der Metropolen Hanoi (1898-1990) und Ho Chi Minh Stadt (1906-1990)

Aber die Monsune sind nicht nur verantwortlich für Regen- und Trockenzeiten, sondern bringen auch tropische Wirbelstürme an die lange Ostküste Vietnams, die das Klima in Hanoi bestimmen. Die Orkane treten im Spätsommer auf, durch die über das Südchinesische Meer strömenden feucht-warmen Luftmassen, die das Wasser auf über 25°C erwärmen und Voraussetzung für die Entstehung von Zyklonen und Taifunen sind (VORLAUFER 2011).

sich in Vietnam laut UN-Prognose, wie auch in vielen Industrieländern, weiter zu spitzen (VORLAUFER 2011). Jedoch ist dies ein Übergangsphänomen hin zu einer langfristig stabilen Bevölkerungsdichte mit einer Ersatzrate, die sich auf einem niedrigen Niveau stabilisiert (Der überhöhte Anteil einer alten Bevölkerung schiebt sich ein Mal – mit allen negativen Übergangsfolgen – durch die gesamte Pyramide hindurch.)

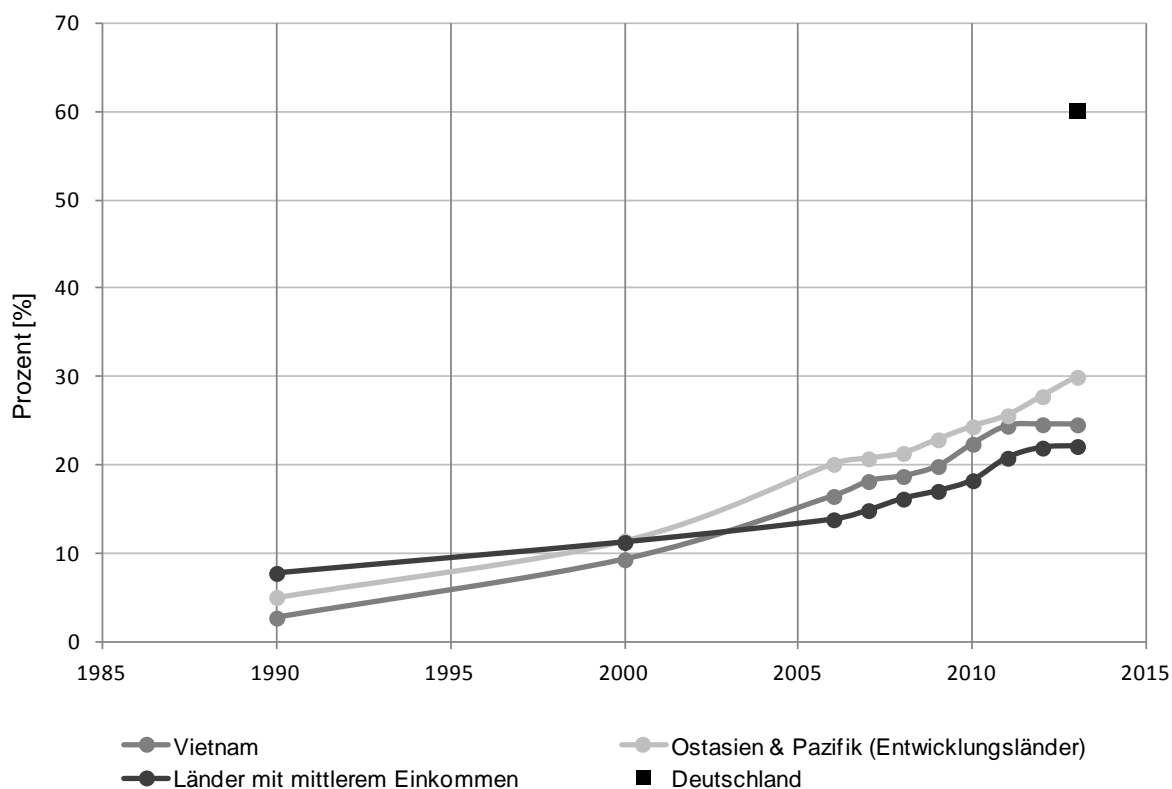
Die Verstädterung ist ein weiterer Aspekt der im Zuge der enormen Bevölkerungszunahme, des großen sozioökonomischen Strukturwandels infolge zunehmender Industrialisierung und des generellen Wirtschaftsbooms einsetzte und in Vietnam zu den beiden Metropolregionen Hanoi und Saigon führte. In diesen Städten versuchen sowohl unqualifizierte wie auch hochqualifizierte Arbeitskräfte einen besseren Lebensstandard als in den ländlichen Regionen zu erreichen. Attraktiv sind nicht nur die überproportionale Arbeitsmarktlage, sondern auch die kulturellen und medizinischen Einrichtungen sowie das bessere Kommunikationssystem in den Metropolregionen. Mit dem exzessiven Bevölkerungswachstum breiten sich allerdings die Städte rasant ins Umland aus. Es entstehen nicht nur Satellitenstädte zur Minderung des Wachstumsdrucks, sondern auch flächenextensive Verkehrsinfrastruktur und Industriezonen. Infolgedessen schrumpfen die landwirtschaftlichen Flächen in der Nähe der Verbraucherzentren, was eine Ursache für die sich abzeichnende Verknappung des Nahrungsmittelangebotes ist. Aber auch extreme Umweltbelastungen in den Metropolregionen aufgrund von Müll- und Abwasserproblemen, Schwierigkeiten in der Trinkwasserversorgung, chaotischen Verkehrsverhältnissen sowie die Entfaltung oft riesiger Slums und Squattersiedlungen sind zu bewältigen (VORLAUFER 2011).

Aber auch auf dem Bildungssektor weist Vietnam Mängel auf, denn bei einem Großteil der Bevölkerung fehlt jegliche Qualifikation jenseits der schulischen Ausbildung (LAN 2013). Die fehlende Fachkompetenz stellt eine große Behinderung für das sonst so erfolgreiche Wirtschaftswachstum von Vietnam dar. Obwohl die Zahl der Studierenden in den letzten Jahren von 15,9 % (2005) auf 24,6 % (2012) (WORLDBANK 2014c) gestiegen ist (siehe Abbildung 2-6), wird von der Wirtschaft die geringe technische und fachspezifische Ausbildung der Absolventen bemängelt. In der Altersklasse 15 und älter haben gerade mal 4,4 % einen akademischen Abschluss und 8,9 % eine Berufsschule besucht, während 86,7 % keine Ausbildung vorweisen können (DINH & MISHRA 2013).

Der Industrie mangelt es aber nicht nur an ausgebildetem Fachpersonal auch die Qualität der Ausbildung ist ungenügend. Absolventen sind nicht in der Lage „real-world“-Probleme zu lösen, kritisch zu denken, in Teams zu arbeiten oder effektiv zu kommunizieren (DINH & MISHRA 2013). Zudem fehlen spezifische technische Fähigkeiten und grundlegendes Ingenieurwissen.

Gründe für den Fachkräftemangel sehen Experten einerseits in der historischen Entwicklung des Bildungssektors, bei dem sich lange auf die kommunistischen Bruderstaaten verlassen wurde, da diese die Ausbildung der bildungspolitischen Elite übernommen

haben. Dies führte dazu, dass nach dem Zusammenbruch des Ostblocks Vietnam vor der Herausforderung stand das eigene Hochschulwesen auf- und auszubauen, welches sich zunächst an der sowjetisch geprägten Struktur orientierte (EGYPTIEN GAD & KLEIN 2012).



Datenquelle: WORLD BANK (2015)

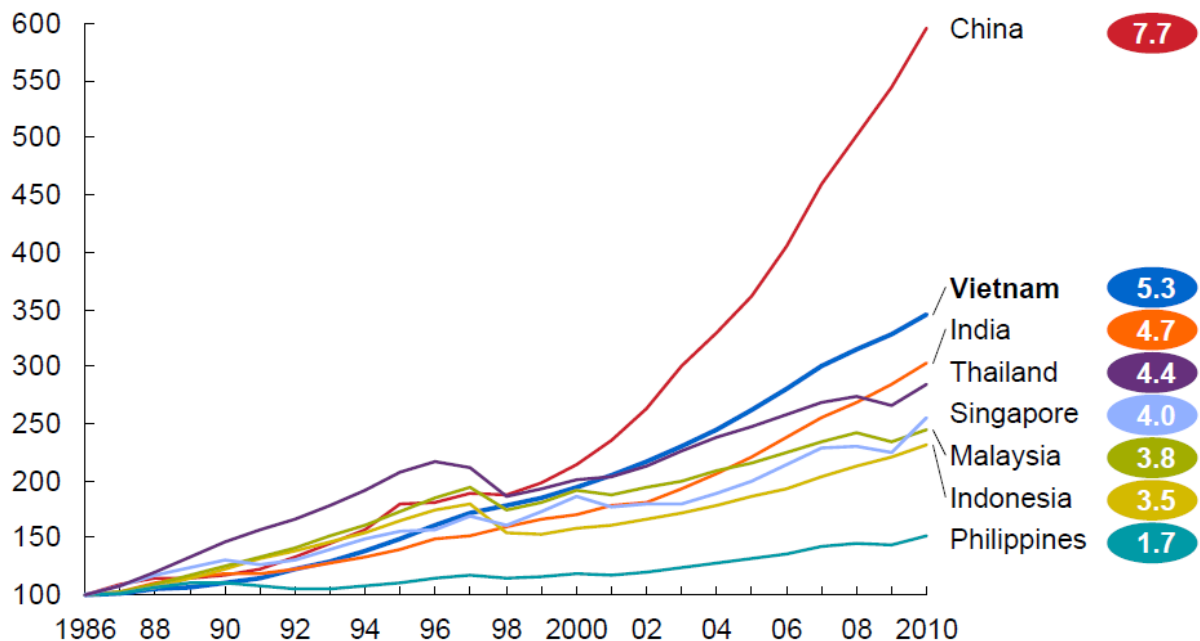
Abbildung 2-6: Entwicklung der Studierendenzahlen von 1990 bis 2013

Andererseits fehlt die Zusammenarbeit von Industrie und Bildungsstätten, was dazu führt, dass die Defizite in der Ausbildung bestehen bleiben und keine Anpassung an die wirtschaftlichen Bedürfnisse vorgenommen wird. Bildungsstätten sind verpflichtet, den von den Ministerien ausgearbeiteten Lehrplan einzuhalten und haben wenig Freiraum sich an die Nachfrage des Arbeitsmarktes anzupassen. Aber auch die mangelhaften Qualifikationen der Dozenten und Ausbilder, die zu 50 % nur einen Bachelorabschluss vorweisen können (EGYPTIEN GAD & KLEIN 2012), die Unterfinanzierung des Bildungssektors und die schlechte technische Ausstattung der Universitäten und Ausbildungsstätten tragen zu der unzulänglichen Ausbildung der vietnamesischen Absolventen und damit dem Fachkräftemangel in der Industrie bei (DINH & MISHRA 2013).

Wirtschaft

In weniger als 25 Jahren hat Vietnam es von einem der weltweit ärmsten Länder zu einem Entwicklungsland mit niedrigem mittlerem Einkommen geschafft (DINH & MISHRA 2013). Die Öffnung und Modernisierung der Wirtschaft, die Integration in die Weltwirtschaft, die Modernisierungsprozesse z. B. in der Landwirtschaft und die Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur (FREHNER 2008) haben dazu beigetragen, dass Vietnam

heute zu den in Asien am schnellsten wachsenden Volkswirtschaften gehört (siehe Abbildung 2-7).



Quelle: BREU et al. (2012)

Abbildung 2-7: Prozentuales Wirtschaftswachstum im asiatischen Raum (1986-2010)

Weitere Faktoren für die rasante wirtschaftliche Entwicklung sind die geografische Lage des Landes und die billige Arbeitskraft, auf die sich vor allem ausländische Firmen verlassen (GROßHEIM 2014).

Die rapide Wachstumspolitik Vietnams ist allerdings mit einem tief greifenden Strukturwandel sowie durch die Industrialisierung und Modernisierung verursachten erheblichen Umweltproblemen verknüpft (KHOA & HO 2006, VORLAUFER 2011). Vietnam war bis vor wenigen Jahrzehnten noch Agrarland. Die Landwirtschaft erwirtschaftete den höchsten Anteil am Bruttoinlandsprodukt (>40 %). Im letzten Jahrzehnt hat sie aber deutlich an Bedeutung, gesamtwirtschaftlich gesehen, verloren, während der Industrie- und Dienstleistungssektor (2013 38,5 % und 42,2 %, CIA 2014) aufgrund der billigen Arbeitskräfte enorm zugenommen hat. Bezüglich der Anzahl der Erwerbstätigen ist der Agrarsektor aber immer noch der wichtigste Wirtschaftszweig des Landes mit 55 % der Beschäftigten (GROßHEIM 2014). Außer Kaffee zählen zu Vietnams wichtigsten landwirtschaftlichen Exportprodukten Holz, Fisch, Reis und Pfeffer (LAN 2013), wobei Vietnam heute der zweitgrößte Reisexporteur ist (GROßHEIM 2014).

Aber nicht nur mit landwirtschaftlichen Produkten ist Vietnam an der Exportwirtschaft beteiligt, auch Rohöl, Textilien, Schuhe und Elektrogeräte sind wichtige Exportprodukte. Daneben besitzt Vietnam Erdöl- und Erdgasvorkommen sowie große Vorkommen an Kohle, Erzen und seltenen Erden, die mit ausländischer Unterstützung in Zukunft effizienter gefördert werden sollen (LAN 2013, GROßHEIM 2014).

Damit die vietnamesische Wirtschaft auch in Zukunft so erfolgreich bleibt und das Billiglohnland zum Standort für eine anspruchsvollere Fertigung wird, müssen einige Herausforderungen gemeistert werden: Die makroökonomische Stabilität muss aufrechterhalten, die Verwaltungs- und Genehmigungsprozesse eingedämmt, mehr Fachkräfte ausgebildet, Ungleichheiten in der Einkommensverteilung und den Wirtschaftssektoren reduziert werden. Zudem müssen die Umwelt- und Infrastrukturprobleme hinsichtlich der Metropolregionen, neuer Seehäfen, des Eisenbahn- und Straßennetzes und der Energieversorgung gelöst werden (BREU et al. 2012, FREHNER 2008, LAN 2013).

2.3.5 Ökologische Rahmenbedingungen

Das rasante Wachstum der Bevölkerung, der Städte und Siedlungen sowie der Wirtschaft sind in Vietnam dafür verantwortlich, dass der Verbrauch und die Übernutzung der natürlichen Ressourcen drastisch angestiegen sind. Die Entsalzung von Böden, der wachsende Ausstoß von CO₂ durch die Verbrennung fossiler Energieträger, der hohe Wasserverbrauch für die Produktion von Industriegütern und der riesige Anfall fester und flüssiger Abfälle, die nicht umweltgerecht entsorgt werden, sind nur einige Umweltprobleme für die Vietnam Lösungen finden muss (VORLAUFER 2011).

Mit dem starken wirtschaftlichen Wachstum ist eine rapide Zunahme des motorisierten Individualverkehrs und der Energieversorgung (siehe Abbildung 2-8) verbunden.



Abbildung 2-8: Individualverkehr und Stromversorgung in Ho Chi Minh Stadt

Die Infrastruktur für Trinkwasserversorgung und Abwasser- wie Abfallentsorgung kann mit den rasant wachsenden Siedlungen der Metropolregionen nicht Schritt halten. Das größte Problem aufgrund der rapiden Abfallzunahme in den letzten Jahren, der nicht ausgereiften Abfallbehandlung und der wilden Deponien, ist die Ausbreitung der gesundheitlichen Probleme. Dieses wird vor allem durch die Kontamination der Grundwasserressourcen und der geringen Kapazitäten der Mülldeponien verursacht. Die steigenden Kosten der Abfallentsorgung machen einen Großteil des Bruttoinlandspro-

duktes aus, auch wenn nur 12 der 61 vietnamesischen Städte laut WORLDBANK (2010) eine geregelte Mülldeponie vorzuweisen haben. Dies ist ein Grund dafür, weshalb zu den häufigsten Abfallentsorgungswegen in Vietnam immer noch die wilde Deponierung zählt.

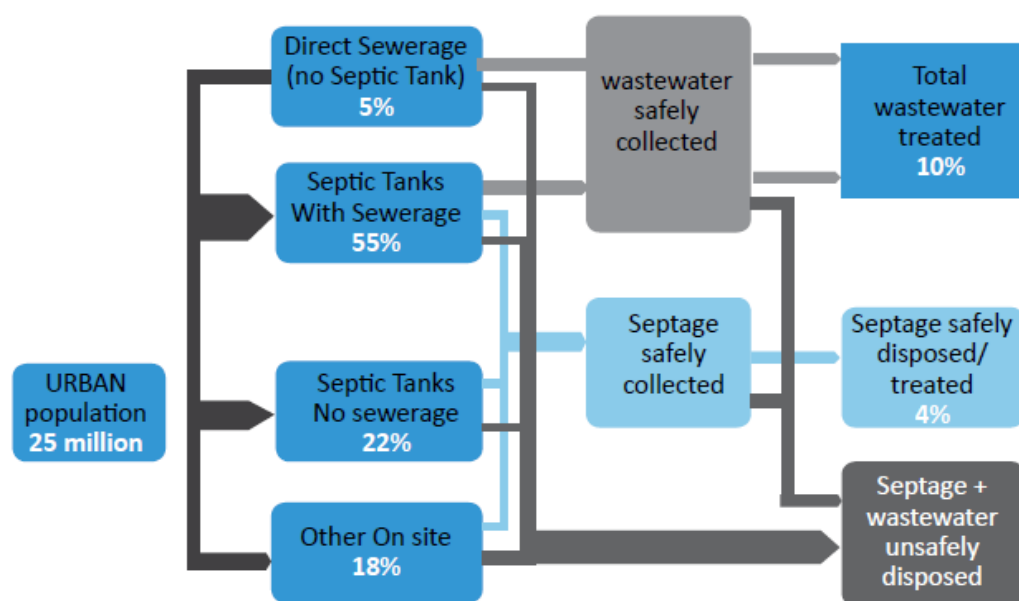
In den letzten 20 Jahren hat die vietnamesische Regierung mit großem Bemühen probiert Strategien, Gesetze und Richtlinien für die städtische Trinkwasserversorgung und die Abwasserentsorgung zu entwickeln sowie in das städtische Abwassernetz und die -reinigung zu investieren (WORLDBANK 2013). Es werden jedoch immer noch weniger als 10 % des städtischen Abwassers behandelt (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010), auch wenn 98 % der in Städten lebenden vietnamesischen Bevölkerung Anschluss an hygienisch einwandfreies Wasser haben. Ein Hausanschluss steht allerdings nur 59 % der städtischen Bevölkerung zur Verfügung, denn mehr als 200 Kreisstädte von ungefähr 650 haben überhaupt kein Trinkwassernetz (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010). In den ländlichen Regionen sind 8 % direkt an eine Trinkwasserversorgung angeschlossen. Dies macht sich besonders in der Trockenzeit bemerkbar. Durch die geringen Grundwassermengen kommt es zu einer Kontamination der offenen Brunnen und Quellen, die der ländlichen Bevölkerung zur Trinkwasserversorgung dienen. Die Folge ist ein rapider Anstieg von Erkrankungen verursacht durch nicht einwandfreies Trinkwasser (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010).

Viele Teile der vietnamesischen Städte wurden während der französischen Kolonialzeit gebaut, die grundlegende Infrastruktur ist veraltet und nicht geeignet für die schnell wachsende vietnamesische Bevölkerung (BUI 2007). Besonders die altertümlichen Wasserleitungen von den Trinkwasseraufbereitungen in die einzelnen Haushalte sind mangelhaft (über 50 %) und führen aufgrund ihres maroden Zustandes zu einer Kontamination des Trinkwassers (BUI 2007, IRIN 2009). Laut World Health Organization (WHO) waren es 2008 noch 20.000 Menschen, die aufgrund hygienisch nicht einwandfreien Trinkwassers und den unzulänglichen Sanitäreinrichtungen in Vietnam gestorben sind (IRIN 2009).

Aber die maroden Trinkwasserleitungen sind nicht allein für die schlechte Trinkwasserversorgung verantwortlich. Es fehlt in allen großen Städten Vietnams an zentralen Kläranlagen und Schlammbehandlungen (BUI 2007), deshalb werden von den anfallenden 3 Millionen m³ Abwasser pro Tag lediglich etwa 250.000 m³/d gereinigt (WORLDBANK 2013).

Wie Abbildung 2-9 zeigt, erfolgt die Ableitung der kommunalen und industriellen Abwässer häufig ungeklärt in die Vorfluter, wodurch diese mit Nähr- und Schadstoffen überladen werden. Flüsse und Gewässer dienen neben den reichen Grundwasservorkommen zur kommunalen und industriellen Trinkwasserversorgung sowie zur Bewässerung in der Landwirtschaft (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010). Das durch die Einleitung der ungeklärten Abwässer verschmutzte Oberflächenwasser wird durch die Nutzung zur

Trinkwasseraufbereitung und landwirtschaftlichen Bewässerung in den natürlichen Wasserkreislauf eingespeist und so zu einem gesundheitlichen Risiko für die vietnamesische Bevölkerung.



Quelle: WORLD BANK (2013)

Abbildung 2-9: Aktueller Stand (2013) der kommunalen Abwasserbehandlung in Vietnam

Ein weiteres großes Umweltproblem in Vietnam ist die fehlende Behandlung der anfallenden Schlämme. Ob es sich um Schlamm aus Latrinen, Fäkalschlamm der Klärgruben oder Klärschlamm von kommunalen und industriellen Kläranlagen handelt, die Behandlung, Verwertung und Entsorgung ist oftmals nicht vorhanden oder so mangelhaft, dass dies zu massiven Umweltverschmutzungen führt. Dafür verantwortlich ist hauptsächlich die illegale Entsorgung mit dem Hausmüll, die willkürlich dort stattfindet, wo der Fahrer des Entsorgungsunternehmens eine gute Abladestelle findet. Nur ein geringer Teil des Schlamms wird kompostiert, auf einer geordneten Mülldeponie entsorgt oder von den Landwirten genutzt (hauptsächlich Latrinenschlamm) (VIET et al. 2013, KLINGEL et al. 2001, HEMA 2011).

2.3.6 Technische Rahmenbedingungen

Die Basis der kommunalen Abwassertechnik in Vietnam sind die Klärgruben. Obwohl jeder Haushalt in Vietnam verpflichtet ist, diese zu installieren, sind in städtischen Gebieten nur 55 % der Haushalte an eine solche Klärgrube angeschlossen (WORLD BANK 2013). Die Entleerung der Klärgrube findet nur unregelmäßig statt (HEMA 2011, KLINGEL et al. 2001). Die unregelmäßige Entleerung und unzureichende Abwasserbehandlung der Klärgruben führt dazu, dass große Mengen an Feststoffen und pathogenen Mikroorganismen aus der Klärgrube in das Abwassersystem eingetragen werden. Letztlich werden, wie Abbildung 2-9 zeigt, nur 4 % des anfallenden Fäkalschlamms in Städten ordnungsgemäß behandelt und entsorgt (KLINGEL et al. 2001).

Neben den zentralen Kläranlagen existieren viele Kleinkläranlagen in Wohngebieten, Hotels, Restaurants, Supermärkten und Krankenhäusern, die allerdings keine Schlammbehandlung für die geschätzten 200-300 t/d vorweisen können (VIET et al. 2013). Die Entsorgung dieser Klärschlämme findet vorwiegend illegal mit dem Hausmüll, direkt in die Gewässer oder an „nicht bekannten“ Orten statt.

Aufgrund der oftmals privaten und illegalen Entsorgung der Latrinen-, Fäkal- und Klärschlämme sowie der mangelhaften Beachtung der zuständigen Behörden existieren nur wenige Daten über die Zusammensetzung der anfallenden Schlamm-mengen. Momentan hat Ho Chi Minh Stadt zwei Kläranlagen, in die ein Mischabwasser aus Kommunen, Industrie, Krankenhäusern und Gewerbe eingeleitet wird. Neun weitere Kläranlagen, ausgestattet mit dem Belebtschlammverfahren und einer täglichen Abwasserkapazität von 100.000-500.000 m³, sind geplant. Pro Kläranlage wird mit einem Schlammanfall von 30-40 t Feuchtmasse pro Tag gerechnet. Zur Behandlung sind Schlamm-trocknungsanlagen angedacht, die den Wassergehalt reduzieren (VIET et al. 2013).

Die Kläranlage Binh Hung in Ho Chi Minh Stadt kompostiert bereits mechanisch entwässerten Klärschlamm, hat aber Schwierigkeiten einen Absatzmarkt für den Klärschlammkompost zu finden. Die umliegenden Obst-, Gemüse- und Blumenbetriebe in Da Lat hingegen bieten einen guten Absatzmarkt für Klärschlammkompost, weshalb dort der anfallende Klärschlamm in Trockenbeeten entwässert und anschließend kompostiert wird.

Auf der Kläranlage Yen So (Hanoi) ist die einzige anaerobe Klärschlammstabilisierung in Vietnam gebaut worden. Die Faultürme haben eine Kapazität von 200.000 m³/d, wobei geplant ist, das entstehende Biogas in einer Gasfackel zu verbrennen, statt es zu nutzen. Die Klärschlammbehandlung ist allerdings noch nicht in Betrieb genommen worden, da der Kläranlagenzulauf zu wenig Kohlenstoff für eine anaerobe Stabilisierung enthält (WORLD BANK 2013). Momentan bleibt demnach Hauptentsorgungsweg für den kommunalen Klärschlamm in Vietnam die Deponierung oder illegale Entsorgung in der Umwelt.

Im industriellen Sektor sieht es ähnlich aus. Zwar sind alle Industriezonen in Vietnam seit 2009 verpflichtet ein Zentralklärwerk zur Reinigung der anfallenden Industrieabwässer zu betreiben, an eine Schlammbehandlung ist dabei gesetzlich jedoch nicht gedacht worden. In Ho Chi Minh Stadt sind 13 zentrale Industriezonen vorhanden, die ein Zentralklärwerk und teilweise zusätzlich firmeninterne Abwasservorbehandlungen besitzen (VIET et al. 2013). Die hier produzierten Schlämme variieren je nach Industriezweig und -unternehmen sehr stark in Menge sowie Zusammensetzung und können Schadstoffe, wie Schwermetalle, organische Schadstoffe, Pestizide etc. beinhalten. Der geschätzte Industrieklärschlamm-anfall liegt laut VIET et al. (2013) bei 300-400 m³/d. Er wird hauptsächlich auf Mülldeponien abgelagert.

2.3.7 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Viele anfallende Schlämme beinhalten ein Wertstoffpotenzial in Form von Nährstoffen, das bei einer Deponierung aber gänzlich verloren geht. Dies sowie die potenzielle Gefahr für die Bevölkerung, die von unbehandelten Schlämmen ausgeht, haben auch die verantwortlichen Behörden in Vietnam erkannt. Trotzdem fehlt es immer noch an Regularien und Gesetzen, die den Transport, die Behandlung und die Entsorgung der verschiedenen Schlämme regeln (VIET et al. 2013).

Einen rechtlichen Rahmen zur Gewährleistung der nachhaltigen Nutzung, der Schonung und der Entwicklung der Wasserressourcen hat Vietnam bereits vor Jahren angefangen aufzustellen, denn die Wasserressourcen sind bedeutend für die Entwicklung der Lebens- und Umweltbedingungen des Landes. 1998 wurde deshalb die Basis für den heute bestehenden Rechtsrahmen zur Schonung der Wasserressourcen gelegt, indem das Rahmengesetz für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen (Law on Water Resources No.08/1998/QH10) von der Nationalversammlung verabschiedet worden ist. Zur Umsetzung des Gesetzes wurde das Decree No. 179/1999/ND-CP veröffentlicht, in dem detailliert die Nutzung und Schonung der Wasserressourcen und die Genehmigungsvoraussetzungen zur Einleitung von Abwasser festgeschrieben sind. Durch die rapide Industrialisierung und Modernisierung im Zuge der Globalisierung und internationalen Integration in den letzten Jahren, hat das Gesetz für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen allerdings seine Grenzen und Unzulänglichkeiten offenbart. Die Erkundung, Ausbeutung und Nutzung der Wasserressourcen ohne Genehmigung sowie das Einleiten von unbehandeltem Abwasser und Klärschlämmen haben die Wasserqualität sehr negativ beeinflusst (NGUYEN 2010a).

Ein großes Problem des umfangreichen Rechtsrahmens sind die schlechte Synchronisierung und Überschneidung der Richtlinien sowie die Gesetzeslücken (WORLDBANK 2013, POGADE & SCHARFE 2012, NGUYEN 2010b). Vietnams Richtlinien sind unterteilt in Gesetze und Verordnungen, die von der Nationalversammlung (höchste verfassungsrechtliche Instanz) verabschiedet werden, und sekundäre Regelungen der Volkskomitees, als die lokale Instanz (NGUYEN 2010a). Das Ministerium für natürliche Ressourcen und Umweltschutz (MoNRE) ist nach der Nationalversammlung die höchste administrative Organisation, autorisiert zur Umsetzung der Verwaltungsprogramme hinsichtlich des Umweltschutzes und zur Koordination der landesweiten Umweltschutzaktivitäten in Vietnam (THANH & MATSUI 2011, NGUYEN & LE 2011). Auf lokaler Ebene sind die Volkskomitees für folgende Aufgaben verantwortlich (NGUYEN & LE 2011, THANH & MATSUI 2011, SCHULENBURG 2012):

- Umsetzung der staatlichen Regularien zum Umweltschutz in ihren jeweiligen Verwaltungsarealen
- Koordination der fachlichen Behörden auf zentralen und lokalen Ebenen

- Projektmanagement und Beratung für den Bau von Behandlungsanlagen im Abwasser-, Schlamm- und Abfallbereich
- Kapitalbereitstellung für die Behandlungsanlagen.

DoNRE ist sowohl dem MoNRE für die Zusammenarbeit, Organisationshilfe und technische Unterstützung als auch dem Volkskomitee hinsichtlich der administrativen und politischen Beziehungen unterstellt (THANH & MATSUI 2011). Zu den Aufgaben des DoNRE gehören die Überwachungen und Kontrolle der Umweltqualität (z. B. Abwasser, Abfall, Wasser) sowie die Umsetzung der durch das MoNRE und Volkskomitee verabschiedeten Richtlinien und Regularien bezüglich des Umweltschutzes (NGUYEN & LE 2011, THANH & MATSUI 2011).

In den letzten Jahren hat Vietnam verschiedene Programme und Strategien im Gewässerschutz und deren Entwicklung verabschiedet und umgesetzt (NGUYEN 2010a). Eins davon ist die „National Strategy on Environmental Protection till 2010 and Orientation towards 2020“, welche mit dem Beschluss des Premierministers No. 256/2003/QD-TTg 2003 angepasst wurde. Auf der Grundlage dieses Gesetzes ist das MoNRE verantwortlich für Anordnung und Ankündigung von Wasserressourcenstandards und die Formulierung und Verkündung von nationalen technischen Regulierungen (NGUYEN 2010a). Wichtige „Vietnamese Environmental Standards“ (TCVN) sind beispielsweise:

- TCVN 5939:2005: Air Quality – Industrial Emission Standards – Inorganic Substances and Dusts
- TCVN 5940:2005: Air Quality – Industrial Emission Standards – Organic Substances
- TCVN 5942:1995: Water Quality Standards – Surface Water
- TCVN 5943:1995: Water Quality Standards – Coastal Water
- TCVN 5944:1995: Waster Quality Standards – Groundwater
- TCVN 5945:2005: Industrial Wastewater Discharge Standards

Neben den TCVN sind gemäß des Gesetzes für Standards und technische Richtlinien (Decision N. 16/2008/QD-BTNMT) „National Technical Regulations on the Environment“ (QCVN) ausgearbeitet worden (NGUYEN 2010b), die üblicherweise eingehalten werden (WORLDBANK 2013). Die Tabelle 2-1 stellt die Einleitgrenzwerte der TCVN 5945 (2005) für industrielles Abwasser der QCVN 40 (2011) gegenüber.

Im Jahr 2007 wurden gleich zwei wichtige Beschlüsse hinsichtlich Abwasser und Schlammentsorgung verabschiedet. Einerseits die Regulierung der Abfallbehandlung im Decree No. 59/2007/ND-CP, andererseits das Decree No.88/2007/ND-CP, das eine wesentliche Entwicklung im städtischen und industriellen Abwassersektor bedeutet, denn es enthält eine Reihe von wichtigen Auflagen zur Reduzierung der Schadstoffe (WORLDBANK 2013).

Tabelle 2-1: Vergleich der Einleitgrenzwerte der TCVN 5945 (2005) für industrielles Abwasser mit der QCVN 40 (2011)

Parameter	Einheit	TCVN 5945:2005		QCVN 40:2011	
		A	B	A	B
pH-Wert	[-]	6-9	5,5-9	6-9	5,5-9
BSB ₅	[mg/L]	30	50	30	50
CSB	[mg/L]	50	80	50	100
AFS	[mg/L]	50	100	50	100
NH ₄ -N	[mg/L]	5	10	5	10
N _{ges}	[mg/L]	15	30	20	40
P _{ges}	[mg/L]	4	6	4	6
Öl und Fett	[mg/L]	10	20	-	-
Coliforme Bakterien	[MPN/100mL]	3.000	5.000	3.000	5.000

Klasse A: Einleitung in Vorfluter erlaubt, die zu Trinkwasserversorgung genutzt werden.

Klasse B: Einleitung in Vorfluter erlaubt, die zu anderen Verwendungszwecken Wasser nutzen, aber geringere Wasserqualitätsanforderungen haben.

Schlamm, der aus einer Abwasserbehandlungsanlage entnommen wird, muss seitdem nach den Regularien der Abfallbehandlung (Decree 59) gehandhabt werden. Bei Abwasser und Schlamm mit gefährlichen Inhaltsstoffen muss nach den Regularien der Sondermüllbehandlung verfahren werden. Trotz des Verweises des Umweltschutzgesetzes auf das Decree 59 wird Klärschlamm und dessen Behandlung in diesem nicht noch einmal explizit erwähnt. Der Artikel 3, Klausel 1, des Decree 59 besagt allerdings, dass die Abfallbehandlung und damit auch die Klärschlammbehandlung folgende Punkte beinhaltet: Planung, Beaufsichtigung, Kapitalanlagen zum Bau von Abfallbehandlungsanlagen, Trennung, Sammlung, Lagerung, Transport, Wiederverwertung, Recycling und Entsorgung des Abfalls unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung und Minimierung negativer Effekte auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit. Auf die Entsorgung des anfallenden Abfalls und Klärschlammes wird in Kapitel 5 des Decree näher eingegangen. Artikel 29 beschreibt die einsetzbaren Abfallbehandlungstechnologien wie folgt:

- 1) Produktion von organischen Düngemitteln
- 2) Produktion von Biogas
- 3) Sickerwasserbehandlung

- 4) Wiederaufbereitung des Abfalls zu Bauprodukten und -material
- 5) Verwertung von nützlichen Abfallinhaltsstoffen
- 6) Deponierung des Hausmülls
- 7) Deponierung des Sondermülls.

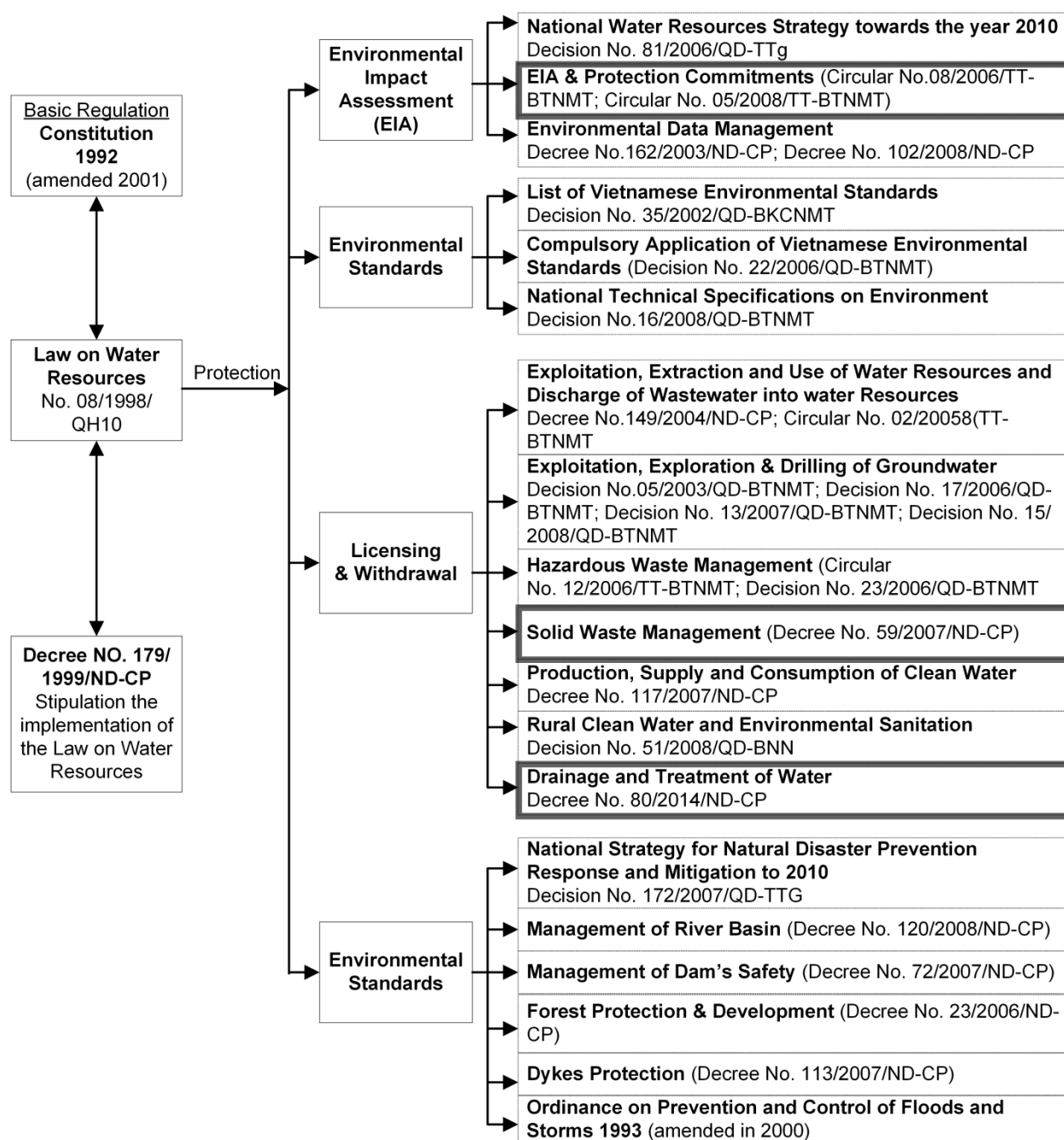
Die Auswahl der Behandlungstechnologie soll laut Artikel 30, Klausel 1-3, aufgrund der Eigenschaften und Inhaltsstoffe des Abfalls sowie den spezifischen Gegebenheiten der Örtlichkeiten getroffen werden. Es wird empfohlen, vollständige und fortschrittliche Technologien zum Recycling und zur Wiederverwertung auszuwählen, um Rohmaterialien und Energie zu gewinnen. Des Weiteren sollen die Technologien den Abfall vollständig entsorgen und das Volumen vor der Verbrennung reduzieren, um Land zur Abfallentsorgung einzusparen und die Umwelt zu schützen.

Das Decree 88 ist bereits im Jahr 2014 novelliert und als Decree 80/2014/ND-CP verabschiedet worden. Es enthält jetzt eine verpflichtende Einführung von Abwassergebühren in urbanen Gebieten und Industriezonen im ganzen Land, die die Kosten für Wartung und Betrieb abwassertechnischer Anlagen von bisher staatlicher Subvention auf die Nutznießer der Dienstleistungen umlegen. Die Berechnung der Abwassergebühren basiert auf den tatsächlich entstehenden Kosten, die je nach Einleiterkategorie und Schmutzfracht (bei Industriebetrieben) mit unterschiedlichen Faktoren multipliziert werden.

Auf den Umgang mit Schlamm wird im Artikel 25 des Decree 80 eingegangen. Demnach wird Klärschlamm nach dem Entstehungsort, Kanalsystem, Kläranlage oder Klärgrube, nach den Schadstoffkonzentrationen und nach gefährlichen Substanzen klassifiziert. Als Kriterien für die Auswahl einer Klärschlammbehandlung werden die Zentralität, Dezentralität und die On-Site-Behandlung angeführt. Des Weiteren sind das Schlammvolumen und -charakteristika, die Stabilität der Technologie hinsichtlich der ökonomischen und technischen Effektivität sowie Anforderungen an Betrieb und Wartung heranzuziehen. Letztlich wird darauf hingewiesen, dass die Technologie umweltfreundlich, energiesparend, geeigneten Schlamm zur stofflichen Verwertung und zur Wärmerückgewinnung produziert.

Bei der Behandlung und Verwertung sind Regularien, veröffentlicht von kompetenten staatlichen Einrichtungen, sowie die Umweltgesetze zu berücksichtigen. Das Bauministerium gibt Anleitungen zur Kalkulation und Verwaltung der Kosten für Sammlung, Transport und Behandlung des anfallenden Klärschlammes.

Die Abbildung 2-10 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Regularien im vietnamesischen Gewässerschutz.



Quelle verändert nach NGUYEN (2010a)

Abbildung 2-10: Schlüsselregularien innerhalb des vietnamesischen Gewässerschutzes

VIET et al. (2013) nennt gerade die Behandlungsstrategie als einen der wichtigen Faktoren, die über den Erfolg oder die Niederlage der Investitionsmaßnahmen und erfolgreichen Klärschlammhandhabung entscheiden. Diese muss für Vietnam noch aufgestellt werden, ebenso wie Richtlinien als auch die Tarifberechnungen in Bezug auf die Klärschlammbehandlung.

Um im Zuge des wirtschaftlichen Aufschwungs auch die Umweltziele zu erreichen, sollten umweltgerechte Schlammbehandlungskonzepte mit einer maximalen Ausschöpfung des Wertstoffpotenzials qualitativ hochwertiger Schlämme zeitnah umgesetzt werden.

2.3.8 Identifikation der Interessensgruppen

Die Identifikation der Interessensgruppen, auch Akteursanalyse genannt, umfasst normalerweise fünf Schritte (VÖCKLINGHAUS et al. 2012, FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002), mit denen als Ergebnis keine objektive Beurteilung der Akteure erzielt werden soll, sondern vielmehr ein Ergebnis aus Bewertungen und Einschätzungen der beteiligten Personen (HÜBNER-SCHMID et al. 2003).

Auf Basis von verschiedenen Leitfäden (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002, GTZ 2006, HÜBNER-SCHMID et al. 2003, VÖCKLINGHAUS et al. 2012) werden für die Akteursanalyse im Rahmen des Schlammbehandlungskonzeptes für vietnamesische Industriezonen folgende fünf Schritte festgelegt:

- 1) Identifikation der Schlüsselakteure
- 2) Beschreibung der Ziele und Interessen
- 3) Bewertung der Einflussmöglichkeiten
- 4) Analyse der gegenseitigen Vernetzung, Zielübereinstimmung, Widerspruch und Konkurrenz der Akteure
- 5) Ableitung akteursspezifischer Handlungsstrategien in Bezug auf die Maßnahmenentwicklung.

Als Akteure werden hier Beteiligte, Betroffene, Entscheidungsträger oder Organisationen sowie Gruppen beschrieben, die in der Regel spezifische Aufgaben-, Rollen-, Macht- oder Beziehungsstrukturen im Hinblick auf das Klärschlammproblem der Industriezonen haben (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002). Da es nicht möglich ist, die Vorstellungen, Bedürfnisse, Interessen und teilweise die persönlichen Situationen aller Akteure bei der Konzepterstellung zu berücksichtigen, müssen die Schlüsselakteure erkannt und deren Ziele sowie Interessen beschrieben werden. Schlüsselakteuridentifikation bedeutet, diejenigen Akteure zu identifizieren, die durch Stellung, Fähigkeiten, Wissen, Vernetzung und Einflussmöglichkeiten die Entscheidung hinsichtlich einer Schlammbehandlung und -verwertung signifikant beeinflussen können (GTZ 2006). Dies erfolgt anhand von drei Kernfunktionen, die sich laut GTZ (2006) wie folgt beschreiben lassen:

Legitimität: Institutionelle Stellung, zugeschriebene oder erworbene Rechte, die beispielsweise durch das Gesetz, den Auftrag und die öffentliche Zustimmung abgesichert sind und für rechtmäßig gehalten werden.

Ressourcen: Wissen, Sachverstand und Fähigkeiten sowie materielle Ressourcen, die es dem Schlüsselakteur erlauben, gestaltenden Einfluss auf Thema und Veränderungsziel auszuüben oder den Zugang zu diesen Ressourcen zu steuern und zu kontrollieren.

Vernetzung: Anzahl und Festigkeit der Beziehungen zu anderen Akteuren, die dem Schlüsselakteur verpflichtet oder von ihm abhängig sind.

Trotz des großen Einflusses der Schlüsselakteure soll eine Entscheidung hinsichtlich der Schlammbehandlung und -verwertung getroffen werden, bei der eine breite Akzeptanz innerhalb der Akteure erreicht wird. Um diese zu erreichen, ist es bedeutsam rational, also transparent, vernünftig, kontrolliert, zweckmäßig und nachvollziehbar, zu entscheiden und zu handeln (FACH 2013). Rationales Handeln ist durch Ziele bestimmt, die durch Wissen, Normen, Werte und Möglichkeiten begründet sind (SLADE 1994). Die Ziele und Interessen sind somit die Begründung für das Handlungsverhalten der an der Entscheidung beteiligten Akteure (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002).

Als Informationsquellen für eine generelle Zusammenstellung, der an der Auswahl der Schlammbehandlung und -verwertung in den vietnamesischen Industriezonen beteiligten Akteure sowie deren Ziele, dienten Zeitungsartikel, Broschüren, Internet, Befragungen sowie die vorhergegangene Umfeldanalyse.

Durch die Verabschiedung von Gesetzen hinsichtlich einer verpflichtenden Abwasser- und damit verbundenen Schlammbehandlung sind die vietnamesischen Industriezonen gezwungen zu handeln und sich Lösungen für die Behandlung des Abwassers und neuerdings auch des Schlamms zu überlegen. Der Gesetzgeber und die verantwortlichen Ministerien induzieren bei Industrieunternehmen und Industriezonenmanagement der vietnamesischen Industriezonen den Handlungsdruck hinsichtlich der Schlammproblematik. Zudem wird durch die bestehenden Gesetze der Handlungsrahmen für die Umsetzung der Schlammbehandlung und der anschließenden Verwertung vorgeschrieben.

Die Volkskomitees, die für die Einhaltung der von den Ministerien aufgestellten Gesetze, Richtlinien und Normen verantwortlich sind, haben hingegen aufgrund der politischen Situation in Vietnam einen starken Einfluss auf die beteiligten Akteure. Die kommunistische Partei, die hinter den Volkskomitees steht, vertritt die Einstellung, dass die Grundversorgung des Landes für die Bürger erschwinglich sein soll. Dieses führte in der Vergangenheit dazu, dass die vietnamesischen Bürger nicht mit Abwassertarifen o. ä. belastet werden sollten und deshalb ist auch weiterhin für die Klärschlammbehandlung und Entsorgung eine möglichst kostengünstige Lösung umzusetzen. Ministerien und Behörden auf allen Ebenen sind den hierarchischen Ebenen hörig und entscheiden nichts ohne die Einwilligung des zuständigen Volkskomitees (Provinz, Bezirk oder Kommune). Allerdings fehlt es sowohl den Ministerien als auch den Volkskomitees an Fachpersonal im Abwasser- und Klärschlammbereich.

Innerhalb der Industriezone sind vier Interessensgruppen zu benennen. Einmal das Industriezonenmanagement, das eine Regierungsbehörde und damit der verlängerte Arm des Volkskomitees ist, und zu deren Aufgabenbereich die Verwaltungsangelegenheiten, die Investorenfindung sowie die Emissionsüberwachung innerhalb der Industriezone zählen. Neben der Umsetzung der Ziele des Volkskomitees liegt das Hauptinteresse des Industriemanagements demnach in der Reduzierung der Emissionen der Industrie-

unternehmen, welche verbunden ist mit einer Steigerung der Standortattraktivität für Investoren. Besonders bei ausländischen Kapitalanlegern können die verbesserten Umweltbedingungen zu einer positiven Entscheidung für den Industriezonenstandort führen.

Als zweite Interessensgruppe ist das Infrastrukturunternehmen der Industriezone zu sehen, das als Kapitalanleger für den Bau, die Infrastruktur und die Grundstücksvermietung der Industriezonen fungiert und seit 2009 auch für den Bau und Betrieb des vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Zentralklärwerkes verantwortlich ist. Dementsprechend hoch ist das Mitspracherecht des Infrastrukturunternehmens bei der Entscheidung über eine zentrale oder dezentrale Schlammbehandlung sowie der Behandlungstechnologie und der Verwertungs- bzw. Entsorgungsoption für das Zentralklärwerk. Für die Behandlung oder Entsorgung der in Industriebetrieben anfallenden Klärschlämme sind die Industrieunternehmen selbst zuständig.

Es besteht zwar die Möglichkeit ein Entsorgungsunternehmen für den Industrieklärschlamm zu beauftragen, doch denken viele Industrieunternehmen aufgrund der Kosten bereits darüber nach, eigene Schlammbehandlungen an die Abwasserreinigungsanlagen anzuschließen. Für diese Unternehmen ist die Auswahl einer geeigneten Behandlungstechnologie in Abstimmung auf die anschließende Verwertung zielführend. Allerdings sollten bei der Technologiewahl nicht nur die Führungsebenen der Industrieunternehmen berücksichtigt werden, es sollten auch die Interessen der Angestellten, die später die Schlammbehandlung betreuen, betrachtet werden. Aufgrund der geringen, fachlichen Kenntnisse im Abwasser- und Klärschlammbereich dieser Angestellten stehen häufig gegenüber der Führungsebene abweichende Ziele im Vordergrund, wie beispielsweise eine einfache Bedienung und Handhabung der Anlage. Entscheidungen werden zwar in der Führungsebene getroffen, aber ohne geeignetes Betriebspersonal, ist der Betrieb schwer zu realisieren.

Für die Konzepterstellung sind darüber hinaus Akteure interessant, die für die Verwertung und Entsorgung der Klärschlämme aktiv werden müssen. Da die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen maßgeblich die einzusetzende Behandlungstechnologie bestimmen, können die Ziele und Interessen der Klärschlammverwerter bzw. -entsorger ebenso Einfluss auf die Erstellung des Konzeptes haben. Hierzu zählen die von den Industrieunternehmen beauftragten Entsorgungsunternehmen, die oftmals den Weg der Klärschlammdeponierung wählen, aber auch Betriebe, die den Klärschlamm thermisch verwerten, sowie die Klärschlammabnehmer der stofflichen Verwertung. Der Einfluss dieser Interessensgruppen ist zwar gering, aber bei der Erzeugung von Klärschlammprodukten, die weiter verwertet oder entsorgt werden müssen, nicht zu vernachlässigen ist.

So verhält es sich auch mit den Anwohnern, die entweder in der Nähe der Schlammbehandlungsanlage leben oder unter den Umweltverschmutzungen leiden, die durch die

bis jetzt unbehandelten Industrieklärschlämme verursacht wurden. Die Anwohner zählen in einem kommunistischen Land, wie Vietnam, sicherlich nicht zu den Entscheidungsträgern - weder in Bezug auf die Klärschlammbehandlung noch in anderen Bereichen - vervollständigen aber das Bild der relevanten Interessensgruppen und sind die Leidtragenden der negativen Umweltauswirkungen unbehandelter Klärschlämme.









Die Identifikation der Schlüsselakteure erfolgt anhand einer Bewertung der vorab beschriebenen Kernfunktionen Legitimität, Ressourcen und Vernetzung, die nach drei Einflussstufen, schwach (weißes Quadrat), mittel (graues Quadrat) und stark (schwarzes Quadrat), beurteilt werden. Als Schlüsselakteure sind diejenigen Akteure einzustufen, die in mindestens zwei der drei Kernfunktionen einen starken Einfluss auf die Konzepterstellung haben (GTZ 2006).

Tabelle 2-2 beinhaltet eine Zusammenfassung der an der Konzepterstellung beteiligten Akteure, deren Hauptinteressen, die Analyse hinsichtlich der drei Kernfunktionen Legitimität, Ressourcen und Vernetzung sowie die Einflussmöglichkeiten auf den Entscheidungsprozess innerhalb der Konzepterstellung.

Die Kernfunktionenanalyse der Akteure hat eindeutig das Industriezonenmanagement, die Infrastrukturunternehmen sowie die einzelnen Industriebetriebe als die Schlüsselakteure identifiziert, die den größten Einfluss auf die Umsetzung einer Alternative innerhalb der Industriezone aufweisen. Beeinflusst werden die Entscheidungen aber oftmals indirekt durch die kommunistische Partei, die einerseits durch Ministerien einen großen Einfluss ausübt, mehr jedoch durch die Volkskomitees. Nicht zu unterschätzen ist in Vietnam die allgegenwärtige Korruption, die die Effizienz der vietnamesischen Ökonomie belastet (HERR & STACHULETZ 2010). Der Korruptionsindex der TRANSPARENCY INTERNATIONAL E.V. (2015) stuft Vietnam auf Platz 119 von 175 Ländern ein. Damit durchzieht die Korruption nahezu die gesamte vietnamesische Ökonomie und Administration und stellt gerade an Schnittstellen von politischer Kontrolle und ökonomischer Macht eine Gefahr dar (HERR & STACHULETZ 2010). Rationale Entscheidungen in Vietnam werden durch die Korruption erschwert und können sich somit auch negativ auf die Umsetzung einer geeigneten Klärschlammlösung auswirken.

Tabelle 2-2: Hauptziele der Akteure und Identifikation der Schlüsselakteure

Akteure	Hauptinteressen	Stellung und Kernfunktionen des Akteurs			Einfluss
		Legitimität	Ressourcen	Vernetzung	
Gesetzgeber/Ministerien	Umsetzung der Umweltprogramme; Koordination der landesweiten Umweltschutzaktivitäten; beeinflusst von der kommunistischen Partei	■	■	■	mittel
Volkskomitee	Umsetzung der staatlichen Regularien, Koordination der fachlichen Behörden, Projektmanagement und Beratung sowie die Kapitalbereitstellung; beeinflusst von der kommunistischen Partei	■	■	■	stark
Industriezonenmanagement	Inländische und ausländische Investorenfindung durch Attraktivitätserhöhung der Industriezone im Umweltbereich; Einhaltung der Gesetze verbunden mit Ansehenssteigerung der Industriezone	■	■	■	stark
Infrastrukturunternehmen der Industriezone	Betrieb des Zentralkläranwerks und kostengünstige Schlammbehandlung/-entsorgung	■	■	■	stark
Industrieunternehmen	Aufstellung und Umsetzung einer geeigneten Lösung für das Schlammproblem ohne hohe Investitions- und Betriebskosten	■	■	■	stark

Angestellte der Industrieunternehmen	Verantwortlich für Abwasser- und Klärschlammbehandlung; einfache Handhabung, Wartung und Betrieb der Anlage	<input type="checkbox"/>			mittel
Entsorgungsunternehmen	Vertragsabschluss zur kostenpflichtigen Entsorgung des Industrieklärschlammes	<input type="checkbox"/>			mittel
Transportunternehmen	Aufträge für Schlammtransporte	<input type="checkbox"/>	<input data-bbox="619 645 655 689" type="checkbox"/>		schwach
Unternehmen für die thermische Verwertung	Energienutzung des getrockneten Klärschlammes zur Kosteneinsparung	<input type="checkbox"/>		<input data-bbox="730 436 767 481" type="checkbox"/>	schwach
Klärschlammabnehmer für die stoffliche Verwertung	Kosteneinsparungen durch den Einsatz von Klärschlamm als Kompost, Bodenverbesserer und Dünger; Verwertung der Klärschlammprodukte mit geringem gesundheitlichen Risiko	<input type="checkbox"/>		<input data-bbox="914 436 951 481" type="checkbox"/>	schwach
sonstige Dienstleister	Vertragsabschluss für z. B. Bauunternehmer	<input type="checkbox"/>		<input data-bbox="1066 436 1102 481" type="checkbox"/>	schwach
Anwohner	Umweltverschmutzung und gesundheitliche Risiken reduzieren; geringe akustische, visuelle und olfaktorische Beeinträchtigung durch die Schlammbehandlungsanlage und Verwertung erzielen	<input type="checkbox"/>	<input data-bbox="1241 645 1278 689" type="checkbox"/>	<input data-bbox="1241 436 1278 481" type="checkbox"/>	schwach



schwacher Einfluss



mittlerer Einfluss



starker Einfluss

Abbildung 2-11 visualisiert den Einfluss der Akteure und charakterisiert damit die Beziehung untereinander.

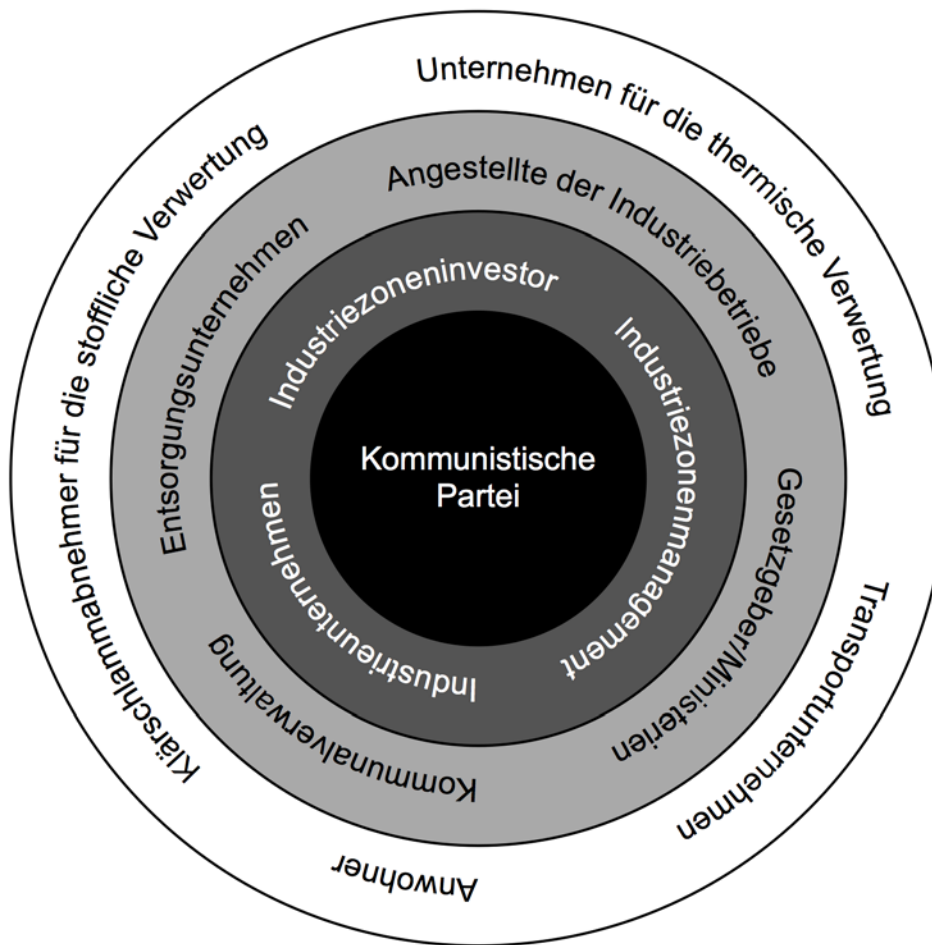


Abbildung 2-11: Einflussmöglichkeiten der Akteure

2.4 Zusammenfassung der Situationsanalyse und Ableitung der Zielkriterien

Die anhand einer umfangreichen Literaturrecherche durchgeführte Umfeld- und Akteuranalyse bietet eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Schlammbehandlungskonzeptes und der notwendigen Behandlungsalternativen für die vietnamesischen Industriezonen. In Tabelle 2-3 sind zunächst die Rahmenbedingungen der Umfeldanalyse zusammenfassend dargestellt und die Zielkriterien für das Schlammbehandlungskonzept abgeleitet worden. Anschließend sind in der Abbildung 2-12 die erarbeiteten Zielkriterien der Umfeld- und Akteursanalyse in einer Übersicht vereint und den Nachhaltigkeitskriterien Gesundheit und Hygiene, Umwelt und natürliche Ressourcen, Technologie und Betrieb, finanzielle und ökonomische Kriterien sowie soziokulturelle und institutionelle Kriterien zugeordnet worden.

Werden die Zielkriterien der Akteure mit denen der Umfeldanalyse verglichen, ist festzustellen, dass besonders die finanziellen und ökonomischen Kriterien einen starken Einfluss auf die Konzepterstellung und Auswahl der Behandlungstechnologie haben.

Der Kostenfaktor trägt damit zur Anerkennung des Schlammbehandlungskonzeptes in vietnamesischen Industriezonen bei. Behandlungstechnologien speziell aus dem Low-Tech- und Low-Cost-Bereich erhalten für die weitere Konzepterstellung eine besondere Gewichtung.

Die in Abbildung 2-12 zusammengefassten Zielkriterien sind allgemein für vietnamesische Industriezonen formuliert worden und müssen an die infrage kommenden Industriezonen angepasst werden. Die Anpassung der Situationsanalyse ermöglicht ein besseres Verständnis für die lokale Sachlage und kann nicht nur die Zielkriterien im Hinblick auf die Gewichtung beeinflussen, sondern auch eine der nachfolgenden Alternativen bereits zu Beginn ausschließen.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Umfeldanalyse und Ableitung der Zielkriterien

	Beschreibung	Ableitung	Zielkriterium
Schwellenland	niedriges mittleres Einkommen HAI 86,4; EVI 30,9	Kapitalvermögen gering geringes Bildungsniveau	geringe Investitionskosten
Sozialistische Republik	Einparteiensystem Kommunistische Partei hat zentrale Rolle in Regierung, Politik und Gesellschaft; Korruption	Verabschiedung von Gesetzen und Veröffentlichungen in den Medien zur Akzeptanzbildung in der Bevölkerung Minimierung der Korruption	Akzeptanz des Konzeptes
Geographie	Subtropenzone (Norden) Tropenzone = Tageszeitenklima (Süden) geprägt durch Monsune und spätsommerliche Orkane	Berücksichtigung von abiotischen Standortfaktoren hinsichtlich Technologie und Verwertung	Beständigkeit gegenüber den Standortfaktoren
Volkswirtschaft	schnell wachsende „sozialistische Marktwirtschaft“; ausländische Direktinvestitionen und Steigerung der Exportrate	Wirtschaftswachstum ist mit tiefgreifendem Strukturwandel und unnötigen Umweltbelastungen verbunden	Flexibilität gegenüber Veränderungen
Wirtschaftssektoren	Zunahme des Industrie- und Dienstleistungssektors, landwirtschaftlicher Sektor Hauptbeschäftigtenzahlen	Angestellte kommen aus dem landwirtschaftlichen Sektor ohne/geringe Schulbildung oder fachspezifische Ausbildung	geringe Verantwortung beim Personal
Industrialisierung	Verbrauchsanstieg und Übernutzung der natürlichen Ressourcen	hoher Wasserverbrauch für Produktion von Industriegütern keine gesicherte Energieversorgung	Schonung der natürlichen Ressourcen
Verstädterung	verursacht durch Industrialisierung sowie starkes Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum	Folgen sind schnell wachsende Megastädten mit wenig Flächen und extremen Umweltbelastungen	geringer Platzbedarf

Bildungsdefizit	fehlende Fachkompetenz und geringe technische sowie fachspezifische Ausbildung	Fachkräftemangel sowie geringes Umweltbewusstsein und kein problemadäquates Umweltverhalten	Unabhängigkeit vom Bildungsniveau
Trinkwasser	Erneuerung und Verbesserung des ländlichen und städtischen Versorgungssystems notwendig	Gefahr der Kontamination des Trinkwassers durch Umweltverschmutzung	sichere Verwertung und Entsorgung
Abwasser	Reinigung von ca. 10 % der Abwässer; 90 % ungeklärt in die Vorfluter	Nähr- und Schadstoffüberlastung	Reduzierung des gesundheitlichen Risikos
Abfall/Klärschlamm	kaum Behandlungsanlagen vorhanden; Hauptentsorgungsweg Deponie	geringe Kapazitäten der Deponien führen zur wilden Deponierung von Abfall und Klärschlamm	Schließung des Nährstoffkreislaufs
Industriezone	Zentralklärwirk verpflichtet seit 2009	Umsetzungsrate gering und zumeist ohne Planung einer Schlammbehandlung	höhere Implementierungsrate
Gesetze/Normen/Richtlinien	MoNRE = höchste administrative Organisation Volkskomitee = höchste lokale administrative Organisation	Umsetzung der Verwaltungsprogramme hinsichtlich Umweltschutz; Koordination der landesweiten Umweltaktivitäten und fachlichen Behörden; Kapitalbereitstellung	Integration der zuständigen Behörden
Decree 59	Klärschlamm = Abfall Entsorgung des Klärschlammes anhand des Abfallrechts	gesetzlich vorgeschrieben: Einsatz einer bewährten und fortschrittlichen Technologie	Verwendung einer angepassten Technologie
Decree 80	Vorschriften zur Klärschlammbehandlung	Auswahl einer Behandlungstechnologie zur Reduzierung der Transport- und Behandlungskosten	geringe Betriebs- und Wartungskosten

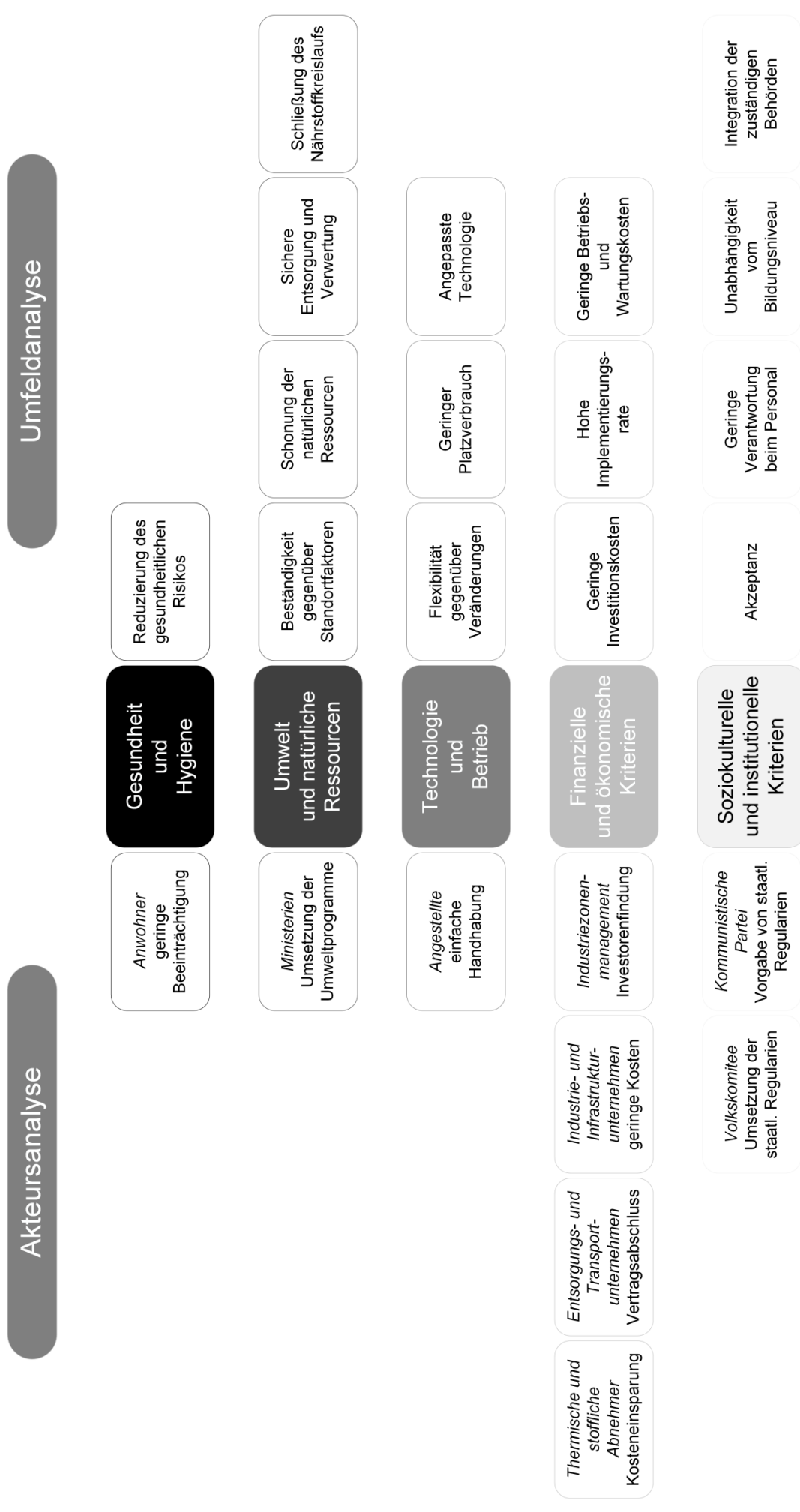


Abbildung 2-12: Übersicht der aus der Situationsanalyse erarbeiteten Zielkriterien

2.5 Festlegung der Alternativen

Aus der Situationsanalyse lassen sich nicht nur die Zielkriterien ableiten, sondern diese führen auch zu den Lösungsansätzen für die Alternativen. Durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen ist für jede in Vietnam registrierte Industriezone ein Zentralklärwerk vorzusehen, an das alle in der Industriezone ansässigen Unternehmen angeschlossen sein müssen. Viele, insbesondere exportierende Industrieunternehmen, betreiben allerdings bereits eine firmeneigene Abwasserreinigungsanlage, was zu einem Konfliktpotenzial zwischen den Industrie- und den Infrastrukturunternehmen der Industriezonen führt. Um die anfallenden Kosten für den Betrieb und Wartung der Zentralklärwerke auszugleichen, ist die Einführung von kostendeckenden Abwassergebühren (sowohl für die Abwasserreinigung als auch für die Schlammbehandlung) in den Industriezonen notwendig (POGADE & SCHARFE 2012). Für Unternehmen, deren Abwasserreinigungsanlagen bisher die Einleitgrenzwerte erfüllt haben, entstehen durch den Anschluss an das Zentralklärwerk und die abzugebenden Abwassergebühren zusätzliche Kosten, die von den Industrieunternehmen gedeckt werden müssen.

Hinzu kommt die Problematik der Schlammbehandlung, deren Lösung in Vietnam gesetzlich noch nicht detailliert festgelegt wurde. Oftmals wird bei Klärwerksplanungen zentral oder in den Industrieunternehmen die Klärschlammbehandlung und -entsorgung nicht berücksichtigt und externe Unternehmen mit der Entsorgung beauftragt. Mit der Verabschiedung des Decree 80 sind aber alle Kläranlagen, kommunal und industriell, verpflichtet Klärschlamm ordnungsgemäß zu behandeln und zu entsorgen. Für das nachhaltige Klärschlammkonzept ergeben sich aufgrund dieser Sachlage die nachfolgend dargestellten Alternativen (Abbildung 2-13).

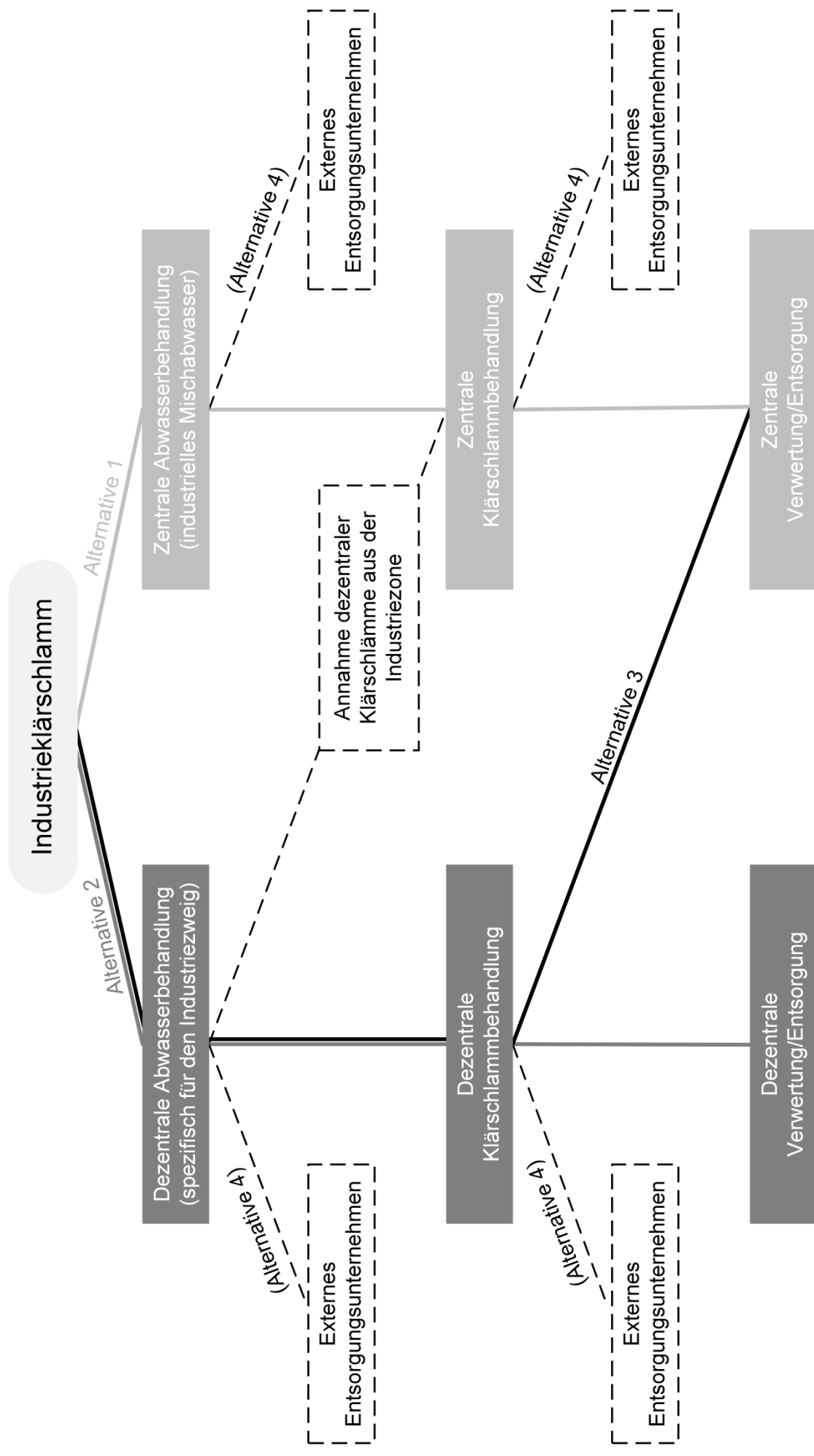


Abbildung 2-13: Alternativen für die Behandlung und Verwertung von Industrieklärschlamm

Der in den vietnamesischen Industriezonen zu behandelnde Industrieklärschlamm entsteht entweder in einer dezentralen Abwasserreinigungsanlage eines Industrieunternehmens, die speziell für das anfallende Produktionsabwasser ausgelegt wurde, oder in dem Zentralklärwerk, das ein Abwassergemisch aus verschiedenen Industriezweigen behandelt. Danach besteht für die Industrieunternehmen die Möglichkeit den angefallenen Klärschlamm zur Behandlung an das Zentralklärwerk abzugeben, ein externes Entsorgungsunternehmen zu beauftragen oder den Klärschlamm dezentral auf dem Betriebsgelände selber zu behandeln. Für die Betreiber des Zentralklärwerkes ergeben sich folgende Optionen nach der zentralen Abwasserreinigung: Beauftragung eines externen Entsorgungsunternehmens oder die zentrale Klärschlammbehandlung. Die zentrale Klärschlammbehandlung umfasst im integrierten Klärschlammkonzept nicht nur den durch die zentrale Abwasserbehandlung produzierten Klärschlamm, sondern auch die Annahme des in der Industriezone dezentral angefallenen Klärschlammes.

Vervollständigt werden die abgeleiteten Alternativen durch die Berücksichtigung der Klärschlammverwertung/-entsorgung, die sich an die Behandlung des Klärschlammes anschließt. Industrieunternehmen können sich nach einer dezentralen Klärschlammbehandlung ebenfalls für eine dezentrale Lösung für die Verwertung/Entsorgung entscheiden. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer für alle Industrieklärschlämme gemeinsamen zentralen Verwertung/Entsorgung oder die Beauftragung eines externen Entsorgungsunternehmens.

KLINGEL et al. (2001) und VIET et al. (2013) berichten hinsichtlich der Klärschlammbehandlung durch externe Unternehmen davon, dass der Klärschlamm ohne Behandlung oder nachhaltige Verwertung größtenteils unkontrolliert in der Umwelt deponiert oder in Gewässern verklappt wird. Zwar müssen auch die externen Entsorgungsunternehmen durch die Verabschiedung des Decree 80 umdenken, doch erscheinen die Einflussmöglichkeiten und damit die Erreichung der aufgestellten Zielkriterien bei diesem Entsorgungsweg gering. Auf eine weiterführende Betrachtung dieser Alternative wird deshalb im weiteren Vorgehen verzichtet. Die externen Entsorgungsunternehmen profitieren dennoch von der Erstellung des nachhaltigen Klärschlammkonzeptes, denn die Ausarbeitung geeigneter Behandlungs- und Verwertungsoptionen für Industrieklärschlämme, kann auch externen Entsorgungsunternehmen als Grundlage für ihre notwendigen Behandlungs- und Verwertungsoptionen dienen, ist für sie aber (noch) nicht verpflichtend.

Wie bereits vorab erwähnt, unterscheiden sich die Klärschlämme der Industriezonen durch ihren Entstehungsort in einer dezentralen Abwasserbehandlungsanlage oder im Zentralklärwerk. Jedes spezifische Abwasser generiert einen spezifischen Klärschlamm und beeinflusst damit die Möglichkeiten für die Behandlung und Verwertung/Entsorgung der Industrieklärschlämme. Nachfolgend werden deshalb die Technologievarianten für die Behandlung, Verwertung und Entsorgung der in vietnamesischen Industriezonen anfallenden Klärschlämme näher betrachtet.

2.6 Auswahl von Varianten für die Behandlung, Verwertung und Entsorgung von Industrieklärschlamm

Die Komponenten der Abwasserreinigung, Klärschlammbehandlung und der Verwertungs-/Entsorgungsoptionen beeinflussen sich gegenseitig. Die geeignetste Technologievariante ist die, die mit den individuellen Zielen der Akteure und Randbedingungen vereinbar ist. Folglich kann eine allgemein gültige Lösung für die Behandlung und Verwertung/Entsorgung von Industrieklärschlamm aus vietnamesischen Industriezonen nicht existieren. Nichtsdestotrotz kann auf Basis der Situationsanalyse bereits eine Eingrenzung der Technologievarianten aus der Vielzahl der existierenden Behandlungs- und Verwertungs-/Entsorgungsoptionen vorgenommen werden.

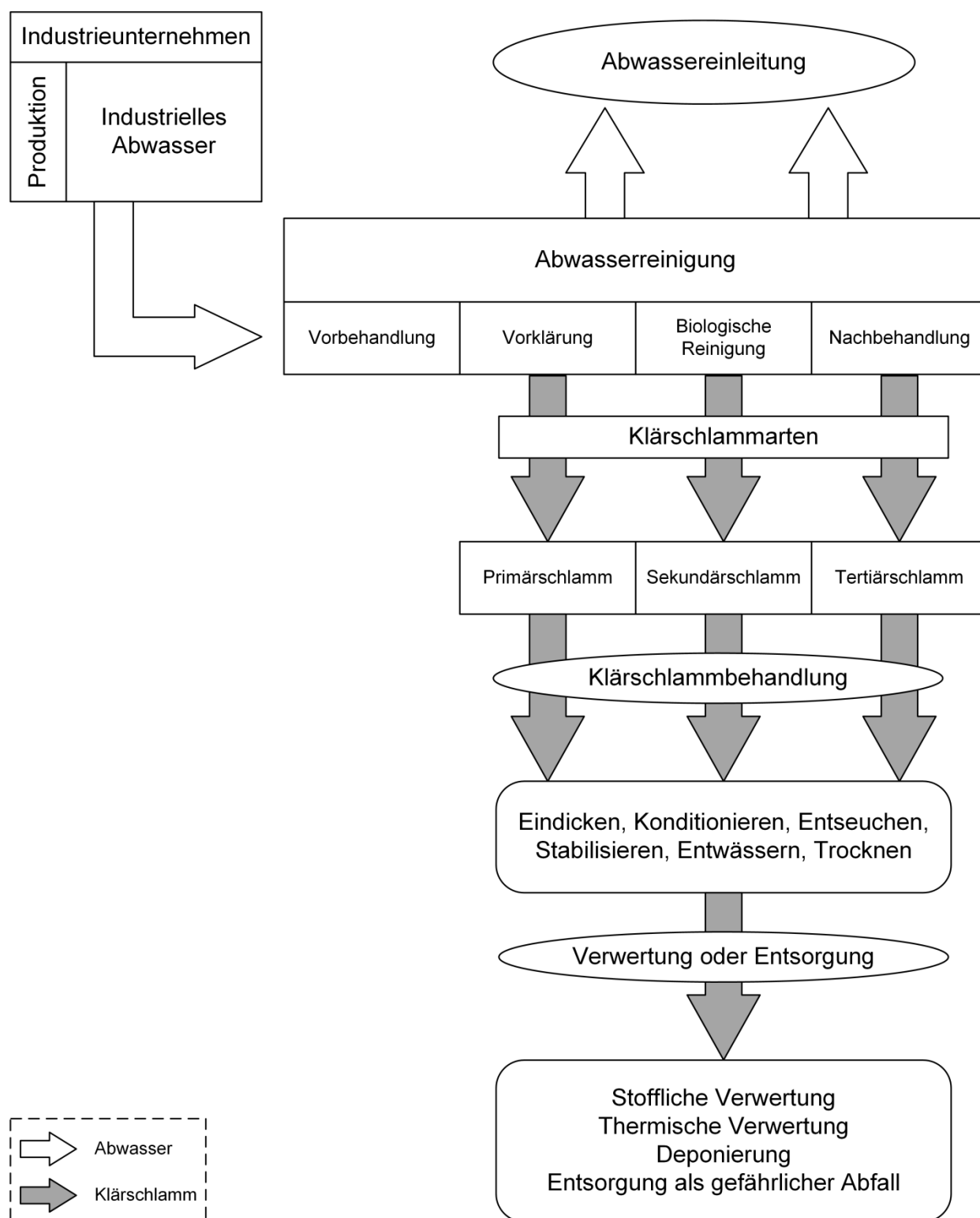
2.6.1 Entstehung und Anfall von Klärschlamm in vietnamesischen Industriezonen

Bei der Abwasserreinigung, kommunal und industriell, werden Feststoffe, organisches Material, wie auch Nähr- und Schadstoffe durch Kombination unterschiedlicher Reinigungsverfahren (mechanisch, biologisch und physikalisch-chemisch) entfernt. Das Industrieabwasser wird demnach bei der Abwasserreinigung in industriespezifische Stoffströme bzw. Stoffteilströme, wie z. B. gereinigtes Abwasser, Rechen- und Siebgut, Fett, Öl sowie Klärschlamm, aufgespalten.

Da Industrieabwasser aus sehr unterschiedlichen Herkunftsbereichen stammt, variieren die Abwasserinhaltsstoffe und damit die Stoffströme stark. Im Vergleich zu kommunalem Abwasser beinhaltet Industrieabwasser höhere Konzentrationen an Schadstoffen, ist in seiner Zusammensetzung variabler und kann toxisch sein (WEF 2008). Dementsprechend weichen auch die industriellen Abwasserreinigungsanlagen vom kommunalen Kläranlagenschema ab. Normalerweise bestehen kommunale Anlagen aus einer mechanischen Vorbehandlung mit Vorklärung, einer biologischen Reinigung und abschließend einer chemisch-physikalischen Nachbehandlung (siehe Abbildung 2-14) (KOPP & DICHTL 2001, WANG & HUNG 2010, SELIVANOVSKAYA et al. 2010).

Die mechanische Vorbehandlung dient dazu die Kläranlage durch Siebe und Rechen vor grob partikulären Abwasserbestandteilen, die langsam hydrolysieren, sowie Sand und Fett zu schützen. In der Vorklärung werden durch den Sedimentationsprozess leicht absetzbare Feststoffe aus dem Rohabwasser entfernt und als Primärschlamm abgezogen und damit der biologische Sauerstoffbedarf (BSB) reduziert (WEF 2012). Durchschnittlich werden 2,5-3 m³ Primärschlamm pro 1.000 m³ Abwasser produziert, die 3-7 % Feststoffe enthalten und einfach einzudicken sowie zu entwässern sind (SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Bei Industriekläranlagen wird aufgrund der Abwasserinhaltsstoffe häufig auf eine Vorklärung verzichtet, Eindickung und Entwässerung können durch die fehlenden Fasern des Primärschlammes erschwert werden. Aber auch allge-

mein zählt die Behandlung der Industrieklärschlämme zu den aufwendigsten (WEF 2008), denn Klärschlamm ist nicht nur ein Speicher für alle im Abwasser befindlichen Nährstoffe, wie Kalium, Phosphor und Stickstoff, sondern auch eine gewollte Senke der enthaltenen Schadstoffe (Schwermetalle, organische Schadstoffe, Reinigungsmittel u.a.).



Quelle: SELIVANOVSKAYA et al. (2010)

Abbildung 2-14: Entstehung, Behandlung und Verwertung/Entsorgung von Klärschlamm

Nach der Elimination der absetzbaren Stoffe in der Vorklärung folgt in der biologischen Reinigung die Entfernung von Nährstoffen mit Hilfe von Mikroorganismen, die durch verschiedene Reinigungsverfahren, wie Tropfkörper, Membranbioreaktoren oder Scheibentauchkörper, erreicht werden kann (SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Die am meisten eingesetzte Reinigungstechnologie, auch für Industrieabwässer, ist das Belebtschlammverfahren (ORHON & BABUNA 2009), bei dem nicht nur der Kohlenstoffgehalt, ausgedrückt als Summenparameter BSB, reduziert wird, sondern durch das daraus resultierende Wachstum an Biomasse auch der Sekundärschlamm (auch Überschussschlamm) produziert wird (KOPP & DICHTL 2001). Dieser kann bei einer fehlenden Vorklärung Rückstände von Fett, Plastikpartikeln, Papier und Faserresten enthalten (SHAMMAS & WANG 2007b). Sekundärschlamm ist darüber hinaus von bräunlicher Farbe, flockiger Struktur und hat einen eher erdigen Geruch, der erst bei längerer Lagerung in Fäulnis umschlägt (WEF 2012). Wie bei allen Schlammarten, wird die Schlammszusammensetzung durch die Abwasserinhaltsstoffe, die vorher eingesetzten Reinigungsprozesse und die Betriebsbedingungen der biologischen Reinigung beeinflusst. Dies wiederum beeinträchtigt die Entwässerbarkeit des Sekundärschlammes vornehmlich durch den hohen Anteil an organischen Feststoffen (KOPP & DICHTL 2001).

Eine physikalisch-chemische Nachbehandlung kommt zum Einsatz, um eine höhere Ablaufqualität vor der Einleitung in den Vorfluter zu erreichen und entfernt Phosphor, pathogene Mikroorganismen sowie nicht absetzbare Stoffe (SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Müssen aufgrund des eingesetzten Verfahrens Chemikalien (Kalk, organische Polymere, Aluminium- oder Eisensalze) zum Abwasser gegeben werden, entscheiden die Chemikalienmenge, die chemischen Bestandteile im Abwasser und die Effizienz des Fällungs- und Flockungs- sowie des Reinigungsprozesses über die anfallende Menge und Zusammensetzung des Tertiärschlammes (SHAMMAS & WANG 2007b). Zur Abschätzung der Tertiärschlammmenge ist die Durchführung von Fällungs- und Flockungsversuchen im Labormaßstab hilfreich.

Im Allgemeinen existieren wenige Angaben zu Industrieklärschlämmen, denn viele Faktoren, wie die Abwasserinhaltsstoffe, die Größe der mechanischen und biologischen Stufe sowie die Betriebsweise, beeinflussen die Schlammmenge. Zwar gibt es Faustregeln für kommunale Anlagen (1 kg TS pro 4 m³ Abwasser), aber auch hier variiert die Schlammmenge und die Verteilung zwischen Primär- und Sekundärschlamm sehr stark (WEF 2012).

Es gibt die Möglichkeit für die Bestimmung der Schlamm-mengen historische Daten, empirische oder modellgestützte Methoden zu verwenden, die je nach Situation, Detailnotwendigkeit und vorhandener Informationen genutzt werden können. Ein empirischer Ansatz für die Bestimmung der Primärschlammmenge sieht wie folgt aus (WEF 2012):

$$PS_M = \frac{Q * TS * E}{1000} \quad (2-1)$$

PS_M = Primärschlammmenge [kg/d]

Q = Abwasserzulauf [m³/d]

TS_{Zu} = Trockensubstanzgehalt im Zulauf [mg/L]

E = Wirkungsgrad der Vorklärung [-]

Die Sekundärschlammmenge ist schwieriger abzuschätzen und zu berechnen, denn viele Faktoren wirken auf die Sekundärschlammproduktion ein, unter anderem die folgenden (WEF 2012):

- die organische Substanz, die dem biologischen System zugeführt und aus der Klärschlamm produziert wird; BSB₅- oder CSB-Fracht [kg/d]
- die Trockensubstanz, die dem biologischen System zugeführt wird und teilweise nicht biologisch abbaubar ist; TS-Fracht [kg/d]
- effektive Verweilzeit des Klärschlammes im biologischen System; Schlammalter [d]
- Abwassertemperatur [°C]
- Charakteristika des Zulaufs, wie die organische Substanz (BSB₅ oder CSB) und die Trockensubstanz, sowie die des biologischen Abwasserbehandlungssystems

Eine Abschätzung der Sekundärschlammmenge kann dennoch mit dem Verhältnis zwischen der Trockensubstanzfracht und dem entfernten BSB₅ errechnet werden, entsprechende Verhältnisse sind in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Typische Sekundärschlammproduktion für verschiedene Behandlungsverfahren

Abwasserbehandlungsprozess	Sekundärschlammproduktion [kg TS/kg BSB ₅]
Belebtschlammverfahren nach Vorklärung	0,7
Belebtschlammverfahren ohne Vorklärung	
Klassisch*	0,85
Langzeitbelüftung und Umlaufgraben	0,65
Kontaktstabilisierung	1,0

*für biologische Systeme mit einer hydraulischen Verweilzeit unter 10 Stunden; Quelle: WEF (2012)

Das Ministry of Natural Resources and Environment (MoNRE) hat 2009 eine Hochrechnung für die täglich anfallenden Industrieabwässer in den vietnamesischen Industriezo-

nen veröffentlicht, die in der Tabelle 2-5 für eine Abschätzung der zu behandelnden Industrieklärschlammmenge in Vietnam genutzt wird.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Klärschlammproblematik beginnt zwar mit der Klärschlammproduktion, geht aber weiter mit der Charakterisierung, der Klärschlammbehandlung sowie der Verwertung und Entsorgung des anfallenden Klärschlamms (SELIVANOVSKAYA et al. 2010), auf die in den nächsten Kapiteln eingegangen wird.

Tabelle 2-5: Industrieller Abwasseranfall und Schadstofffrachten der Industriezonen in den vier Hauptwirtschaftsregionen Vietnams (2009)

Region	Q [m³/d]	CSB [kg/d]	BSB ₅ [kg/d]	TS [kg/d]	PS [kg TS/d]	ÜSS mit VK [kg TS/d]	ÜSS ohne VK [kg TS/d]
Nördliche Wirtschaftsregion	155.055	49.463	21.243	34.112	25.584	14.870	18.057
Zentrale Wirtschaftsregion	58.808	18.760	8.057	12.937	9.703	5.640	6.848
Südliche Wirtschaftsregion	413.400	131.875	56.636	413.400	68.211	39.645	48.141
Mekong Delta Wirtschaftsregion	13.700	4.370	1.877	3.014	2.261	1.314	1.595
Gesamt Vietnam	640.963	204.467	87.812	141.012	105.759	61.468	74.640
Industriezweig	Q [m³/d]	CSB [mg/L]	BSB ₅ [mg/L]	TS [mg/L]	PS [kg TS/d]	ÜSS mit VK [kg TS/d]	ÜSS [kg TS/d]
Brauerei	700-2.500	1.250-3.600	600-1.650	150-400	300	1.260	1.530
Brennerei	42-1.225	3.000-18.000	500-15.000	180-4.030	1.000	3.437	4.173
Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie	400-2.500	1.410-3.000	500-2.000	45-510	302	1.269	1.541

Industriezweig	Q [m³/d]	CSB [mg/L]	BSB ₅ [mg/L]	TS [mg/L]	PS [kg TS/d]	ÜSS mit VK [kg TS/d]	ÜSS [kg TS/d]
Fischverarbeitung	135-1.200	1.440-4.200	400-3.000	350-1.500	463	794	965
Kaffeeproduktion	50-400	4.800-10.000	2.660-5.000	130-5.100	441	603	732
Milchverarbeitung	50-800	920-4.300	480-3.400	120-2.000	338	577	701
Nudelproduktion	30-35	1.000-2.000	410-2.000	200	5	27	33
Pharmazeutische Produkte	30-1.500	150-18.500	100-12.400	30-1.500	298	2.275	2.763
Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe	216-1.584	2.000-5.200	500-2.500	800-1.800	878	945	1.148
Tabakverarbeitung	150	4.500-11.800	760-4.200	140-600	2.061	8.824	10.715
Tapioka-Industrie	3,6	41.000	2.700	23.000	9.195	16.163	19.626
Textilherstellung	22-9.750	245-11.150	60-5.100	13-1.112	62	7	8
Zellstoff- und Papierherstellung	4-27.240	2.770-6.660	850-2.540	200-1.600	42	260	316

Quelle verändert und ergänzt nach MoNRE (2009) und Ng (2006)

2.6.2 Charakterisierung von Industrieklärschlämmen

Die Charakterisierung der Industrieklärschlämme wird genauso wie die Klärschlammmenge durch viele Faktoren beeinflusst und verändert. Die Inhaltsstoffe des Industrieabwassers und deren Konzentration variieren aufgrund der industriellen Produktionsabläufe, den Herstellungsprozessen und dem Betriebsablauf (Schichtdienst, Kampagnenbetrieb etc.) je nach Industriezweig und Unternehmen stark. Die Abwasserbehandlungsverfahren werden an das vorliegende Industrieabwasser angepasst und wirken sich auf die Klärschlammproduktion sowie die Eigenschaften des Industrieklärschlammes aus. Aber auch die anschließende Klärschlammbehandlung bewirkt eine Veränderung der Eigenschaften und hat somit Einfluss auf die Klärschlammproduktion.

Die Qualität und damit auch die Charakterisierung der Klärschlämme wird durch Parameter definiert, die in drei Kategorien eingeteilt werden: physikalische, chemische und biologische Parameter. Tabelle 2-6 gibt einen Überblick über die wichtigsten Klärschlammparameter.

Tabelle 2-6: Zusammenstellung wichtiger Parameter für die Charakterisierung von Klärschlamm

Parameter	Einheit	Erklärung
1. Physikalische Kennwerte		
Trockengehalt (TR)/ Wassergehalt	[%] [g/L]	Gravimetrische Bestimmung der Schlamm-trocken- masse Trocknung der Probe bei 105°C bis zur Gewichtskon- stanz
Glühverlust (GV)/ Glührückstand (GR)/ organischer Trockenrück- stand (oTR)	[%] [g/L]	Anteil an organischer Substanz in der Trockenmasse Probe wird bei 550°C verglüht; Glühverlust entspricht dem organischen Anteil, Glührückstand dem anorga- nischen Anteil
Konditionierbarkeit	[-]	Wasserbindevermögen wird durch Konditionierungs- mittel (z. B. anorganische oder organische Polymere) herabgesetzt und die Entwässerbarkeit verbessert
Kapillare Fließzeit (CST)	[s]	Geschwindigkeit der Wasserabgabe der Schlamm- probe; Filtrationseffekt wird bewirkt durch kapillare Saugkraft; Messergebnis beeinflusst vom Feststoff- gehalt
Entwässerbarkeit	[-]	Bestimmung mit Hilfe von thermogravimetrischen Messungen; Parameter zur Abschätzung der zu ent- sorgenden Schlammmenge und damit der anfallen- den Kosten

Parameter	Einheit	Erklärung
Heizwert	[kJ/kg]	Kalorimetrische Bestimmung; entspricht der nutzbaren Wärmemenge von 1 kg Brennstoff bei vollständiger und vollkommener Verbrennung unter konstantem Druck; Gehalt abhängig von der organischen Substanz

2. Chemische Kennwerte

pH-Wert	[-]	Elektrometrische Bestimmung mit einer Glaselektrode; pH-Wert von Schlämmen meist im neutralen Bereich
Organische Säuren	[mg/L]	Indikator für Hemmungen oder Überlastung des Faulprozesses; Summe aller organischen Säuren sollte < 5 mmol/L liegen; Einzelbestimmung mit Gaschromatograph
Nährstoffe (C-, N-, P-Verbindungen)	[mg/L]	Stabilisierungsverhalten von Schlämmen wird durch C-Verbindungen bestimmt; N- und P-Gehalte sind quantitativ bedeutsam für die landwirtschaftliche Verwertung; Einstufung als Phosphatdünger möglich, enthält wenig Kalium

3. Biologische Kennwerte

Pathogene Mikroorganismen	[KBE/mL]	Konzentration wichtig für die direkte landwirtschaftliche Verwertung; besonders Primärschlamm enthält hohe Anzahl an pathogenen Mikroorganismen, weshalb dieser als seuchenhygienisch äußerst bedenklich eingestuft wird
Faulgaszusammensetzung	[Vol.-%]	Abhängig von der Schlammzusammensetzung; bei Normalbedingungen besteht Faulgas aus 60-70 Vol.-% Methan, 26-30 Vol.-% CO ₂ und Spuren von H ₂ S, N ₂ und H ₂ , abweichende Gaszusammensetzungen sind entweder substratbedingt oder deuten eine Störung im Faulprozess an

Die Beschaffenheit der Industrieklärschlämme ist neben den produkt- und produktionsbedingten Faktoren durch klimatische Verhältnisse wie auch die sozialen Strukturen und den Entwicklungsstand (Industrie- oder Entwicklungsland) geprägt.

Ein auffälliges Beispiel für den kommunalen Abwasserbereich führt ORTH (2006) an, der im Gegensatz zu Industrieländern ungewöhnlich niedrige BSB-Konzentrationen in Entwicklungsländern festgestellt hat. Als mögliche Ursachen nennt er nicht nur die unkontrollierten Fremdwasserzuflüsse ins Kanalsystem, sondern auch die oftmals gesetzlich vorgeschriebene On-Site-Behandlung des Abwassers, die überwiegend in Klärgruben durchgeführt wird und zu niedrigen BSB-Konzentrationen im Zulauf des zentralen Klärwerks führt. Des Weiteren ist die Kreislaufführung von Produktionswasser und Effizienz

der Wassernutzung geringer entwickelt als in Industrieländern. Die Folge ist eine Verdünnung der Konzentrationen im Zulauf der betriebseigenen Kläranlage oder des Zentralklärwerkes. In beiden Beispielen ist das Resultat ein Klärschlamm, der geringere Konzentrationen aufweist als üblicherweise in Industrieländern anfallen.

Einen Vergleich zwischen kommunalen und industriellen Klärschlamm in Entwicklungsländern ist in LATIFF et al. (2010) zu finden, der eine Charakterisierung der verschiedenen Klärschlämme in Malaysia vorgenommen hat.

Tabelle 2-7: Charakterisierung von kommunalen und industriellen Klärschlamm in Malaysia

Parameter	Einheit	Kommunal			Industriell
Trockengehalt	[%]	46,2	36,7	54,5	94,3
organischer Trockenrückstand	[%]	50,0	59,5	57,5	51,0
pH-Wert	[-]	6,87	5,19	6,00	6,06
Kohlenstoff	[%]	29,0	34,51	33,35	29,58
Stickstoff	[%]	1,4	3,23	4,39	3,19
C/N-Verhältnis	[%]	20,71	10,68	7,59	9,27
Phosphor	[%]	1,52	0,71	1,09	1,98
Kalium	[mg/kg]	696,73	539,50	521,10	861,61
Natrium	[mg/kg]	246,21	433,70	235,22	401,38
Calcium	[mg/kg]	1,27	0,89	2,06	1,01
Eisen	[mg/kg]	2,8	2,01	1,02	3,13
Kupfer	[mg/kg]	122,83	171,21	258,72	768,56
Zink	[mg/kg]	1.280,30	1.316,99	7.110,10	5.757,92
Blei	[mg/kg]	73,60	93,55	223,40	338,28
Magnesium	[mg/kg]	1.769,50	667,57	1.766,05	2.982,50
Chrom	[mg/kg]	15,15	112,17	90,83	1.325,56
Cadmium	[mg/kg]	3,35	3,77	6,28	6,57
Nickel	[mg/kg]	28,14	25,88	43,12	162,25

Parameter	Einheit	Kommunal			Industriell
Aluminium	[mg/kg]	0,91	1,8	1,18	1,67
Mangan	[mg/kg]	389,07	296,55	322,48	460,23

Quelle verändert nach LATIFF et al. (2010)

In dem von LATIFF et al. (2010) untersuchten Industrieklärschlamm sind im Vergleich zum kommunalen Klärschlamm auffällig hohe Konzentrationen an Schwermetallen zu finden. Bei der Abwasser- und Klärschlammbehandlung können zu hohe Schwermetallkonzentrationen zu einer Hemmung oder Absterben der für den biologischen Abbau verantwortlichen Mikroorganismen führen. Es ist also für die Auswahl der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen notwendig, nicht nur die Nährstoffkonzentration, sondern auch die Schadstoffe zu bestimmen.

Neben den Schwermetallen befinden sich gerade im Industrieabwasser sowie im resultierenden Klärschlamm organische Schadstoffe, die giftig und gefährlich für Lebewesen sein können. Resultierend aus dem langsamen Abbau können die organischen Schadstoffe lange in der Umwelt verbleiben, sich über die Nahrungskette anreichern und bei der Aufnahme durch den Menschen schwere gesundheitliche Schäden verursachen (SPERLING et al. 2005a). Als Hauptquelle für organische Schadstoffe nennen SPERLING et al. (2005a) folgende Industriezweige: Chemie- und Kunststoffindustrie, Herstellung mechanischer Produkte, pharmazeutische Industrie, Pestizidherstellung, Gießereien und Stahlproduktion, Ölindustrie, Wäschereien sowie Holzindustrie.

Für die Charakterisierung von Industrieklärschlamm enthält Tabelle 2-8 wichtige Parameter, die je nach Industriezweig im Abwasser zu finden sind (BÖHNKE 1979). Weitere Parameter können für die nachfolgenden Behandlungsschritte und die Verwertung sowie Entsorgung des resultierenden Klärschlammes eine Rolle spielen.

Tabelle 2-8: Eigenschaften und Inhaltsstoffe einiger industrieller Abwässer

Parameter	Industriebranchen
hohe Temperatur	Kraftwerke, alle Industrien, Wäschereien, Flaschenwaschanlagen der Brauereien und Getränkeindustrie
hoher Gehalt an Schwebstoffen	Papierfabriken, Pappefabriken, Holzschleifereien, Zellstofffabriken, Wollwäschereien, Kohlenwäschen
hoher Gehalt an absetzbaren Stoffen	Gerbereien, Brauereien, Schlachthöfe, Zuckerfabriken, Kohlebergbau, Walz- und Hochofenwerke, Glasbläsereien, Kieswäschen

Parameter	Industriebranchen
hoher Gehalt an organischer Substanz (BSB ₅)	Schlachthäuser, Fleischwarenfabriken, Abdeckereien, Leimfabriken, Gerbereien, Lederfabriken, Sauerkrautfabriken, Konservenfabriken, Seifenfabriken, Zellstofffabriken
hoher Gehalt an gelösten Stoffen	Erdölindustrie, Kohlebergbau, Schwefelkiesgruben, Salinen, Kaliindustrie, Sodafabriken, Chemische Industrie, Gerbereien, Enthärtungsanlagen, Sauerkrautfabriken
Säuren	Margarinen- und Sauerkrautfabriken, Herstellung künstlicher Fettsäuren, Seifenfabriken, Bleichereien, Schwefelkiesgruben, Beizereien, Galvanisierungsbetriebe, Sprengstofffabriken, Chemische Industrie, Kerzenfabriken, Kohlegruben, Viskosefabriken
Alkalien	Textilfabriken, Metallwarenfabriken, Chemische Industrie, Gerbereien, Wäschereien, Gaswerke, Wollwäschereien
Öle und Fette	Molkereien, Margarinefabriken, Schlachthäuser, Fleischwarenfabriken, Seifenfabriken, Erdölindustrie, Gerbereien, Wollwäschereien, Kerzenfabriken, Metallbearbeitung
Detergentien	Seifenfabriken, Textilfabriken, Färbereien, Wäschereien
Färbung	Papier- und Pappefabriken, Gerbereien, Färbereien, Farbenfabriken, Kunstseidefabriken, Galvanisierungsbetriebe

Quelle verändert nach BÖHNKE (1979)

Liegt eine Charakterisierung des Industrieklärschlammes vor, können im nächsten Schritt die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen aufgestellt werden. Abwasserreinigung, Klärschlammbehandlung und die gewählte Verwertungs- bzw. Entsorgungsoption müssen im Zusammenhang betrachtet werden, um ein effektives und ressourcenschonendes Behandlungskonzept aufzustellen.

2.6.3 Verwertungs- und Entsorgungsoptionen für Industrieklärschlämme in Vietnam

Wirtschaftlich betrachtet nimmt die Klärschlammbehandlung und -entsorgung 50 % und mehr der gesamten anfallenden Kosten ein. Da Investitionen für Sanitäreinrichtungen nicht nur eine Klärschlammbehandlung umfassen, sondern auch Kanalsysteme, Trinkwasseraufbereitungsanlagen etc. beinhalten, wird lediglich ein geringer Teil des zur Verfügung stehenden Kapitals im Sanitärbereich in die Klärschlammbehandlung und -entsorgung investiert (JIMENEZ et al. 2004). Als mögliche Verwertungs- und Entsorgungsoptionen stehen grundsätzlich die stoffliche und thermische Verwertung, die Deponierung und die Entsorgung als gefährlicher Abfall zur Verfügung. Einen Überblick der möglichen Verwertungs- und Entsorgungsoptionen gibt Abbildung 2-15.

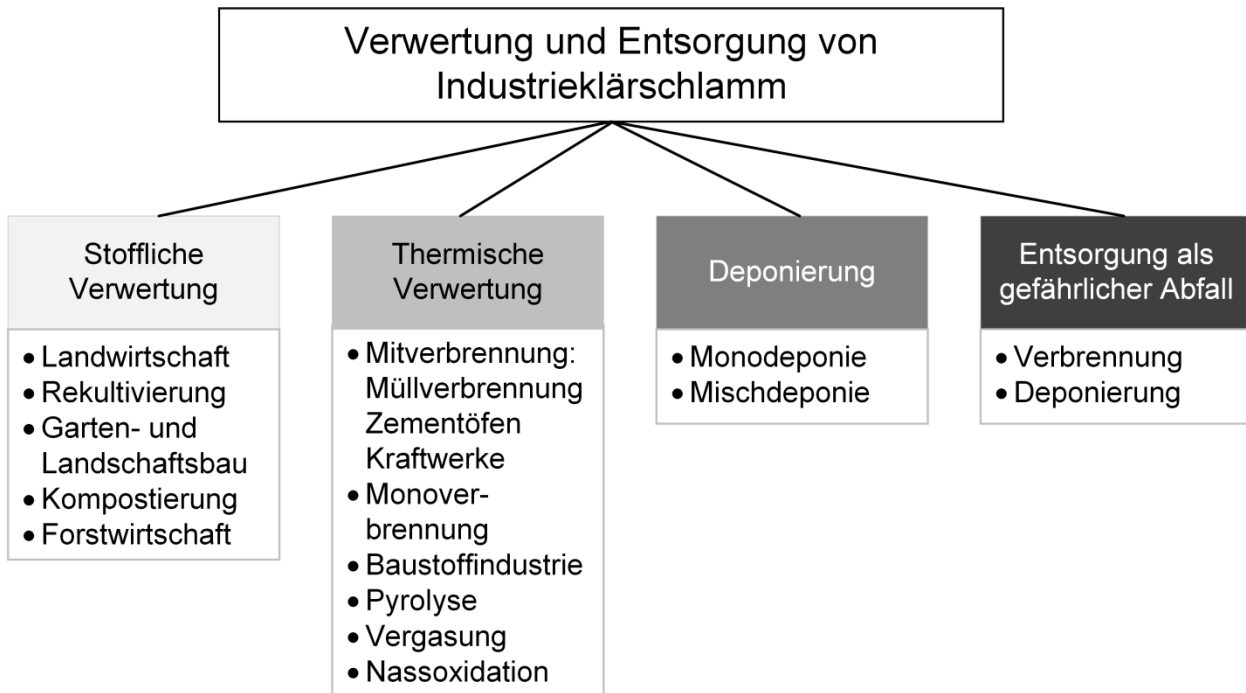


Abbildung 2-15: Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten für Industrieklärschlämme

Stoffliche Verwertung

Einer der gängigsten Verwertungsmöglichkeiten ist die landwirtschaftliche Ausbringung von Klärschlamm, bei der dieser als Sekundärnährstoffdünger eingesetzt wird und einen Teil des Nährstoffbedarfs (Stickstoff, Phosphor sowie Mikronährstoffe wie Nickel, Zink und Kupfer) von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen abgedeckt (WIECHMANN et al. 2012). Klärschlamm verbessert die Bodeneigenschaften, wie Humusbildung, Textur und Wasserbindekapazität, wodurch die Verhältnisse für ein günstiges Wurzelwachstum verbessert und die Trockenheitstoleranz der Vegetation erhöht werden, was von Relevanz in der vietnamesischen Trockenzeit ist (SHAMMAS & WANG 2007c).

Weitere Vorteile der landwirtschaftlichen Ausbringung von Klärschlamm sind nach SHAMMAS & WANG (2007c) die Eignung für jede Kläranlagengröße, die geringen Investitionen verglichen mit den anderen Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten, das Vorhandensein von Transport- und Ausbringungsequipment bei Landwirten und der geringe Platzbedarf auf dem Kläranlagengelände (abhängig von der ausgewählten Stabilisierungsmethode).

Traditionell wurden in der vietnamesischen Agrarproduktion nur organische Dünger verwendet, wie Stalldung, Strohdung, Komposte, Fäkalien, Jauche und Gülle. Durch das schnelle Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen steigenden Nahrungsmittelproduktion („Grüne Revolution“), stieg jedoch der Bedarf und die Verwendung von Mineraldüngern (LE HUNG 2003). Die inländische Düngemittelproduktion deckt trotz steigender Produktionszahlen bislang nicht die Nachfrage an Mineraldüngern, weshalb über 26 % von 9,88 Millionen t Mineraldünger in 2012 importiert werden muss-

ten (VINACHEM 2010). Vor allem Superphosphat (Diammoniumhydrogenphosphat) und Kaliumprodukte zählen zu den Importprodukten (VINACHEM 2010, NGUYEN 2012a). Um eine ordnungsgemäße Düngung nach „guter fachlicher Praxis“ zu gewährleisten, ist eine ausgewogene Düngung notwendig, die die Kulturpflanzen mit allen benötigten Nährstoffen ausreichend und im richtigen Verhältnis versorgt, hochwertige pflanzliche Nahrungs- und Futtermittel erzeugt sowie gleichzeitig Düngungsfehler und dadurch bedingte Boden-, Wasser- und Luftbelastungen vermeidet (SCHEFFER et al. 2002, HA et al. 2005). HA et al. (2005) stellten bei ihren Untersuchungen in Vietnam fest, dass gerade die Kombination aus Mineral- und organischen Düngern ein ausgewogenes Gleichgewicht an Nährstoffen für die untersuchten Kulturpflanzen liefert und sowohl die Bodenverhältnisse durch die organischen Dünger verbessert als auch die Erträge gesteigert werden können. In Tabelle 2-9 sind die Nährstoffgehalte von organischen Düngemitteln und Klärschlamm im Vergleich zu Wirtschaftsdüngern zusammengetragen.

Tabelle 2-9: Nährstoffgehalte von organischen Düngemitteln und Klärschlamm im Vergleich zu Wirtschaftsdüngern

	TS [%]	P ₂ O ₅ [kg/t TS]	K ₂ O [kg/t TS]	MgO [kg/t TS]	CaO [kg/t TS]
Wirtschaftsdünger:					
Rindermist	23	2,9	9,6	41,7	
Schweinemist	23	6,5	7,4	2,7	
Komposte:					
Bioabfallkompost	64	5,1	8,0	5,3	32,3
Grünschnittkompost	61	3,1	6,1	4,6	25,3
Klärschlammkompost*	32	1,3	0,3	0,4	
Klärschlämme:					
flüssig	3,5	2,3	0,2	0,3	2,0
entwässert	25	20	0,8	2,4	15,6

Quelle: LWL NRW (2014); *LHL (2012)

Eine landwirtschaftliche Verwertung der Industrieklärschlämme in Vietnam könnte somit nicht nur dazu beitragen die Bodenverhältnisse zu verbessern, sondern auch die Kosten für Mineraldüngemittel zu reduzieren. Laut den Berechnungen von LE HUNG (2003) kann etwa ein Drittel der notwendigen Düngemittel mit organischem Dünger ersetzt werden.

Die Düngung ist allerdings bedarfsgerecht, standortsabhängig und umweltverträglich anzupassen (SCHEFFER et al. 2002), weshalb nicht alle Industrieklärschlämme und landwirtschaftlichen Flächen für eine stoffliche Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft geeignet sind und einzelfallspezifisch entschieden werden muss. Hierfür ist zu

beachten, dass Klärschlamm nicht nur eine Nährstoffquelle, sondern eine Schadstoffsenke darstellt (vgl. Kapitel 2.6.3). Die im Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe (Schwermetalle und organische Schadstoffe), insbesondere bestimmter Industrieklärschlämme, können zu negativen Auswirkungen auf Gewässer, Böden und Luft führen (SHAMMAS & WANG 2007c). Übersteigen die Schwermetallkonzentrationen bestimmte Grenzwerte, besteht die Möglichkeit einer toxischen Wirkung auf die Bodenfauna, die gedüngten Kulturpflanzen sowie letztlich den Menschen. Da speziell in Klärschlamm eine Anreicherung der Schwermetallkonzentrationen stattfinden kann, ist eine kontinuierliche Untersuchung von Arsen, Kadmium, Kupfer, Chrom, Quecksilber, Nickel, Molybdän, Blei, Selen, Zink und Kobalt bei einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zwingend erforderlich (SPERLING et al. 2005b).

Organische Schadstoffe im Klärschlamm können ebenfalls gefährlich sein. Bei einer direkten Absorption durch die Pflanzenwurzeln, können einige organische Schadstoffe durch die Kapillargefäße in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert werden und so in die Nahrungskette gelangen. Als besonders schädlich stufen SPERLING et al. (2005b) aromatische und phenolische Kohlenwasserstoffe, Pestizide, polybromierte Biphenyle (PBB) und polychlorierte Biphenyle (PCB) ein. Durch die Sonnenenergie kann bei einer landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes eine Photooxydation ausgelöst und durch Verflüchtigung oder Abbau die strukturellen und schädlichen Eigenschaften der organischen Schadstoffe signifikant verändert werden (SPERLING et al. 2005b).

Zusätzlich zu den Schwermetall- und organischen Schadstoffkonzentrationen können die pathogenen Mikroorganismen, wie Bakterien, Viren, Protozoen und Darmwürmer, hochkonzentriert im Klärschlamm vorliegen. Da die Pathogene durch den Menschen ins Abwasser und damit in den Klärschlamm gelangen, ist die Konzentration bei Industrieklärschlamm je nach Industriezweig und einleitenden Stoffströmen in die Kläranlage zu vernachlässigen. Bei einer direkten landwirtschaftlichen Ausbringung auf den Ackerboden wird die Überlebenszeit der pathogenen Mikroorganismen durch die Sonneneinstrahlung herabgesetzt, während das Einarbeiten in den Ackerboden die pathogene Überlebensspanne verlängert, aber gleichzeitig das Kontaktrisiko für Mensch und Tier verringert (SPERLING et al. 2005b). Liegen sehr hohe Konzentrationen an pathogenen Mikroorganismen vor, können diese durch zusätzliche Schlammbehandlungsschritte vor einer landwirtschaftlichen Ausbringung reduziert werden.

Wenn genügend landwirtschaftliche Flächen in der Nähe des Industriebetriebes oder der Industriezone zur Verfügung stehen, können geeignete Industrieklärschlämme kostengünstig stofflich verwertet werden. Besonders geeignet sind Klärschlämme der Lebensmittel-, der Zellstoff- und Papier-, der Chemie- sowie der Pharmaindustrie (WEF 2008). Im Allgemeinen ist die landwirtschaftliche Verwertung, wenn der zu verwertende Industrieklärschlamm die gesetzlichen Voraussetzungen erfüllt, eine durchaus geeignete Verwertungsoption für Vietnam, die abhängig vom Standort vorrangig zu prüfen ist.

Als weitere stoffliche Möglichkeiten zur Klärschlammverwertung stehen die Rekultivierung, die Forstwirtschaft und die Verwendung im Garten- und Landschaftsbau zur Verfügung. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist es sinnvoll, die positiven Eigenschaften des Klärschlammes zu nutzen und für die Rohböden den Aufbau eines bodenarttypischen Humusgehaltes, eine Strukturverbesserung und Verbesserung des Säurehaushaltes, eine Bodenbelebung, die Behebung der vorhandenen Nährstoffarmut sowie eine nach Möglichkeit uneingeschränkte Nutzung anzustreben (BERNSDORF et al. 2008, KEDING et al. 1994). Dem Ziel der Bodenverbesserung entsprechen Ausbringungsorte wie Bergbauhalden/-kippen für Kohle, Kies, Sand, Phosphate oder andere Mineralien, Deponien, Erdbauwerke, Bodenabtragsflächen, Altlasten, Siedlungs-/Industriebrachen, Renaturierungsflächen, Park-, Garten- und Sportanlagen sowie Lärmschutzwälle (LEBLANC et al. 2008, KEDING et al. 1994, SELIVANOVSKAYA et al. 2010, HAUBOLD-ROSAR 2007). Laut KEDING et al. (1994) können im Bereich der Rekultivierung- und Landschaftsbaumaßnahmen einmalig Klärschlamm-mengen von mehreren 100 t TS/a verwertet werden.

Aber auch hier ist zu bedenken, dass bei der Ausbringung die geltenden Schadstoffgrenzwerte für Klärschlamm eingehalten werden müssen und die Nährstoffbedürfnisse der Pflanzen sowie des Bodens zu beachten sind (KEDING et al. 1994, SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Bei einer zu hohen Menge an freigesetztem Stickstoff beispielsweise kann es bei grundwassernahen Standorten oder in Karstgebieten zu einer Nitratinfiltration ins Grundwasser kommen (KEDING et al. 1994).

Die Urbanisierung und das wirtschaftliche Wachstum Vietnams haben viele Auswirkungen auf die Umwelt, die von der Regierung und Bevölkerung bewältigt werden müssen. Vorrangig sind die Trinkwasserversorgung, die Abwasserreinigung und die Abfallwirtschaft. Rekultivierung, Altlastensanierung, Deponieabdichtungen etc. werden momentan noch wenig umgesetzt.

Seit den 1980ern hat die Wiederaufforstung zunehmend an Bedeutung bei den politischen Entscheidungsträgern gewonnen, weshalb die vietnamesische Regierung verschiedene Programme zur Neubesiedelung und Aufforstung (z. B. der Tropical Action Plan sowie das Gesetz zur Waldentwicklung und -bewahrung) ins Leben gerufen hat (CLEMENT & AMEZAGA 2008, VIEN 2008). Aufforstungen werden hauptsächlich auf kargen Böden durchgeführt, auf denen das Pflanzenwachstum durch die fehlenden Nährstoffe limitiert ist (MATTHEWS 2001). Eine Klärschlamm-düngung dieser Böden kann nicht nur zu einer Produktivitätssteigerung der aufgeforsteten Wälder durch die Zufuhr von Nährstoffen und Humus führen, sondern auch zur Verbesserung der Bodenstruktur und -feuchtigkeit (SELIVANOVSKAYA et al. 2010).

Die Kompostierung ist ebenfalls eine stoffliche Verwertungsmöglichkeit für Industrieklärschlämme, welche laut SCHULENBURG (2012) aufgrund der hohen organischen Anteile in Abfällen und Klärschlämmen zu den besonders attraktiven Optionen der Verwertung in

Vietnam zählt. Der Autor berichtet von einigen bereits existierenden Kompostierungsanlagen für organische Abfälle in Vietnam, deren Absatz jährlich gesteigert wird und für Ho Chi Minh Stadt eine Kompostproduktion von 192.000 t/a in den nächsten Jahren prognostiziert. Die Bin Hung Kläranlage in Ho Chi Minh Stadt hingegen produziert Kompost aus mechanisch entwässertem Klärschlamm und hat Schwierigkeiten den Klärschlammkompost abzusetzen (WORLDBANK 2013). Ein Grund hierfür ist laut NGUYEN & LE (2011) der bevorzugte Gebrauch von Mineraldüngern der vietnamesischen Landwirte. NGOC & SCHNITZER (2009) führen zusätzlich an, dass die Kompostierung zwar zu den Low-Tech-Lösungen zählt, aber hohe Betriebs- und Wartungskosten vorweist. Die Abbildung 2-16 zeigt die Kompostierungsanlage auf der Kläranlage Bin Hung.



Quelle: VIET et al. (2013)

Abbildung 2-16: Kompostierungsanlage der Kläranlage Bin Hung

Nichtsdestotrotz sind in den vietnamesischen Städten viele private Kompostierungsunternehmen gegründet worden, als eine häufig und für Vietnam typische Kompostierungstechnologie setzen diese die Wurmkompostierung ein, die bis zu 30 USD/t Kompost einbringen kann (THANH & MATSUI 2011). Aufgrund der bereits vorhandenen Kompostierungseinrichtungen ist dieser Verwertungsweg für die anfallenden Industrie-klärschlämme in Betracht zu ziehen.

Thermische Verwertung

Die thermische Klärschlammverwertung ist ein Prozess, bei dem die organischen Bestandteile des Klärschlammes in der Anwesenheit von Sauerstoff verbrannt werden, zählt aber streng genommen nicht als Entsorgung, da der Klärschlamm lediglich in Asche umgewandelt wird (SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Aufgrund der drastischen Massen- und Volumenreduzierung - einer der Vorteile dieser Verwertungsoption - wird die Klärschlammverbrennung laut SELIVANOVSKAYA et al. (2010) traditionell jedoch den Verwertungsoptionen zugeordnet. Weitere Vorteile sind die Zerstörung von pathogenen Mikroorganismen und der im Schlamm enthaltenen organischen Schadstoffe, Einbindung anorganischer Schadstoffe in die Asche, die Aufkonzentrierung der Schwermetalle, das Energierückgewinnungspotenzial sowie die Ressourceneinsparung (NGUYEN & LE 2011, TCHOBANOGLOUS 2003, THANH & MATSUI 2011).

Diese Vorteile machen die thermische Verwertung zu einer sehr attraktiven Option, allerdings gilt das nicht für Länder mit niedrigem Einkommen, wie Vietnam (NGOC & SCHNITZER 2009). Hier zählt die thermische Verwertung aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten, dem benötigten gut ausgebildeten Personal und den Kosten für die vorab notwendige Klärschlamm Trocknung zu den ungeeigneten Verwertungsmöglichkeiten (NGOC & SCHNITZER 2009, TCHOBANOGLIOUS 2003, BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ 2005). Zudem gehen wertvolle Nährstoffe (z. B. Phosphat) sowie Humus endgültig verloren oder müssen aufwendig aus der Asche zurückgewonnen werden (WIECHMANN et al. 2012). Nicht nur die oft langen Transportwege, sondern auch die bei der thermischen Verwertung entstehenden Schadstoffemissionen (Rauchgas) sind Belastungen für Mensch und Umwelt (TCHOBANOGLIOUS 2003, WIECHMANN et al. 2012, SELIVANOVSKAYA et al. 2010).

Die wenigen Verbrennungsöfen, die in Vietnam existieren, werden für Sonder- und Medizinabfall genutzt und zählen nicht zu den üblichen angewendeten Verwertungsmethoden (NGUYEN & LE 2011, SCHULENBURG 2012, THANH & MATSUI 2011). Probleme entstehen in Vietnam bei der Einhaltung der technischen Standards für die Brenntemperatur und die Emissionsgase Dioxin und Furan, deren Analysetechnologie zur Konzentrationsbestimmung in Vietnam gänzlich fehlt (SCHULENBURG 2012, THANH & MATSUI 2011). Die hohen Betriebskosten sorgen laut SCHULENBURG (2012) schon jetzt dafür, dass die Verbrennungsöfen nicht betrieben und der Sonderabfall gemeinsam mit dem Hausmüll entsorgt wird. Der Autor berichtet von einigen Projekten zur Hausmüllverbrennung, die ein erster Schritt in Richtung einer besseren Abfallentsorgung in Vietnam sein könnten.

Für die thermische Verwertung von Klärschlamm bietet sich daher vorerst in Vietnam die Mitverbrennung in Kraftwerken an. Die Monoverbrennung von Klärschlamm hat zwar den Vorteil einer möglichen P-Rückgewinnung, bringt aber eine zusätzliche Belastung durch Transportkosten und die zur Auslastung relevanten hohen Klärschlamm-mengen mit sich, die aufgrund der wenigen Abwasserreinigungsanlagen in Vietnam fehlen. Für eine Mitverbrennung sind neben den im Bau befindlichen Müllverbrennungsanlagen auch Kraft- und Zementwerke geeignet, die den Klärschlamm als Zuschlagstoff einsetzen, dies gilt allerdings nur soweit die Problematik der Gasemissionen und des fehlenden Fachpersonals gelöst wird.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Aschenrückstände eine adäquate Entsorgung benötigen, denn es besteht die Möglichkeit einer Auswaschung der enthaltenen Schwermetalle und späteren Aufnahme durch Pflanzen (SPERLING et al. 2005b). Da in Vietnam bis dato kaum geordnete Mülldeponien mit entsprechender Sickerwasserbehandlung existieren und eine Entsorgung der Ascherückstände ohne hinreichende Deponieabdichtung zu erheblichen Umweltproblemen führen kann, ist die thermische Verwertung der Industrieklärschlämme in Vietnam kritisch zu betrachten.

Deponierung

Aus Kostengründen wird in Entwicklungsländern, wie auch in Vietnam, die Deponierung als häufigste Entsorgungsmethode für Abfälle und Klärschlamm gewählt. Dies kann eine sichere Entsorgung des Klärschlammes ohne Gesundheits- und Umweltschäden bedeuten, wenn die Deponie ordnungsgemäß angelegt und überwacht wird (SPERLING et al. 2005b). In Vietnam hingegen wird laut VIET et al. (2013), SCHULENBURG (2012) und NGUYEN & LE (2011) Klärschlamm zwar zusammen mit Hausmüll entsorgt, doch zu meist, illegal oder auf offenen Deponien ohne Barrieren für Sickerwasser und Gas abgelagert, was mit entsprechenden Risiken für den Menschen und die Umwelt verbunden ist. Die Kapazitäten für eine geregelte Müllablagerung sind mit knapp 91 landesweiten Mülldeponien, davon 17 geordnete Deponien in 12 von 61 Städten, begrenzt (SCHULENBURG 2012). Die Bevölkerung und Industrie greift deshalb zu Selbstentsorgerlösungen und führt damit erhebliche Umweltprobleme, wie Geruch, Luftverschmutzung, Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser sowie Böden, herbei (THANH & MATSUI 2011). Neue Deponiestandorte sind in Vietnam aus diesem Grund dringend erforderlich. Das hat auch die vietnamesische Regierung erkannt. Jedoch wird laut SCHULENBURG (2012) die Effektivität und Leistungsfähigkeit der vorhandenen Mülldeponien und Abfallbehandlungssysteme durch die nicht vorhandenen Führungskapazitäten, den Kenntnismangel an Abfallströmen und die ineffektiven Investitionen im Abfallsektor stark eingeschränkt.

Außerdem besteht bei einer Deponierung von Klärschlamm, egal ob auf einer Mono- oder Mischdeponie, keine Möglichkeit die im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe zurückzugewinnen (SPERLING et al. 2005b). Es wird lediglich der Klärschlamm entsorgt. Erst durch den anaeroben Abbau des Klärschlammes nach der Ablagerung wird neben anderen Produkten auch Methangas produziert, welches bei entsprechenden Deponieabdichtungen und Gassammelsystemen zurückgewonnen und als Energiequelle genutzt werden kann (SPERLING et al. 2005b, SELIVANOVSKAYA et al. 2010). Da aber die meisten Deponien in Vietnam weder eine Barriere für das entstehende Sickerwasser noch ein Gassammelsystem vorweisen (NGUYEN & LE 2011), ist eine Methangasnutzung in Vietnam momentan nur einzelfallspezifisch möglich.

Die bereits in den letzten Abschnitten angeführten Argumente sowie der Konkurrenzkampf um geeignete Flächen, die steigenden Deponierungskosten, die strikter werden den Umweltregularien und die Einführung von Recyclingrichtlinien, machen die Deponierung zu einer nicht nachhaltigen Entsorgungsmöglichkeit, die in den nächsten Jahren aus umwelttechnischer Sicht immer unattraktiver werden wird (TOT et al.). Da in Vietnam jedoch eine geringe Anzahl an geordneten Deponien vorhanden ist, sollte für die Entsorgung der Industrieklärschlämme geprüft werden, ob im Einzelfall als Übergangslösung eine sichere Deponierung möglich ist.

Entsorgung als gefährlicher Abfall

Gefährlicher Abfall enthält nach dem vietnamesischen Umweltschutzgesetz von 2005 giftige, radioaktive, entflammbare, explosive, abrasionsfähige, ansteckende, schädliche oder auf andere Weise gesundheitsschädliche Stoffe, die einer besonderen Behandlung und Entsorgung zugeführt werden müssen. Die gefährlichen Abfallstoffe und ihre Konzentration sind abhängig vom Industriezweig, Entstehungsort u.a., können durch das Abwasser in den Klärschlamm eingetragen werden, wodurch dieser als gefährlicher Abfall eingestuft wird und dementsprechend transportiert, gelagert, behandelt und entsorgt werden muss.

Industrieklärschlamm, der als gefährlicher Abfall eingestuft worden ist, wird laut VIET et al. (2013) verbrannt und die Asche anschließend verfestigt, um sie lager- und transportfähig zu machen. Die anschließende Entsorgung wird vom Autor nicht beschrieben, lediglich darauf hingewiesen, dass Industrieklärschlamm häufig mit Hausmüll gemeinsam entsorgt wird, um Müllentsorgungskosten zu sparen. THAI (2009) hingegen hält in seinem Statusbericht fest, dass gefährlicher Abfall in Vietnam größtenteils nicht ordnungsgemäß entsorgt wird. Der gefährliche Abfall wird auf Deponien, die nicht für gefährlichen Abfall ausgelegt sind, oder direkt am Erzeugungsort, beispielsweise durch die Einleitung von Klärschlämmen und giftigen Flüssigkeiten in den Ablauf der Kläranlage, entsorgt (THAI 2009). Durch die illegale Entsorgung gelangen die giftigen Schadstoffe ins Oberflächen- und Grundwasser und verursachen erhebliche Umweltschäden. Die Einführung von Sondermüllbehandlungsanlagen, die den Sicherheits- und Umweltstandards entsprechen, ist deshalb dringend notwendig (THAI 2009).

Die Einstufung der Industrieklärschlämme als gefährlicher Abfall sollte also, wenn anhand der Inhaltsstoffe und deren Grenzwerte möglich, vermieden werden. Es ist sinnvoll bei problematischen Abwasserinhaltsstoffen nicht die traditionelle „end-of-pipe“-Technologie zu verwenden, sondern bereits an der Schadstoffquelle anzusetzen (ELBERG JØRGENSEN & HOLM KRISTENSEN 2005). Erreicht wird eine „saubere“ Produktion laut ELBERG JØRGENSEN & HOLM KRISTENSEN (2005) durch Veränderungen im Vorgehen und Verhalten des Personals auf allen Ebenen. Zudem sind Umgestaltungen der Produktionseinrichtungen und -anlagen sowie der Prozesse oftmals unumgänglich, um eine langfristige Verbesserung der Abwasser- und damit Klärschlammqualität zu gewährleisten. Die Entsorgung des anfallenden Industrieklärschlammes als gefährlicher Abfall in Vietnam kann jedoch auch mit einer „sauberen“ Produktion nicht gänzlich vermieden werden. Die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen sind in Tabelle 2-10 für die Situation in Vietnam vergleichend zusammengefasst. Im Einzelfall werden nur die Verwertungs- und Entsorgungswege, die alle relevanten Kriterien für die vorliegende Situation erfüllen, als geeignet eingestuft.

Tabelle 2-10: Auswahlmatrix für die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen

Parameter	Beschreibung	Landwirtschaftliche Verwertung	Rekultivierung	Landwirtschaftsbau	Forstwirtschaft	Kompostierung	Monoverbrennung	Mitverbrennung	Deponierung
Schlammbehandlung <i>Entwässerung</i>	neben der Änderung des mechanischen Verhaltens und der Handhabung des Klärschlammes hat die Entwässerung einen entscheidenden Einfluss auf die Transport- und Entsorgungskosten; aufgrund des geringen Kapitalvermögens in Vietnam wird ein geringerer Trockensubstanzgehalt favorisiert	+	-	-	+	-	-	-	-
Stabilisierung	für die stoffliche Verwertung als Behandlungsschritt zwingend erforderlich, bei der Deponierung aufgrund der Gasbildung sinnvoll, allerdings verbunden mit einer Erhöhung der Behandlungskosten, die in Vietnam gering sein sollten	-	-	-	-	+	+	+	+/-
Lagerung	Lagerung notwendig als Puffer bei limitierten Kapazitäten und Ausbringungszeiträumen; Lagerungsfläche und ggf. weitere Stabilisierungsschritte notwendig, um Geruch und Schädlingseffekte entgegenzuwirken; Fläche in Industriezonen begrenzt	-	-	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-
Transport	Beförderungsmittel abhängig von Feuchtigkeitsgehalt; Einfluss auf die Klärschlammqualität und großer Kostenfaktor	+	+/-	+/-	+	+/-	-	+/-	+

<i>Quantität</i>	die thermische Verwertung reagiert sensibel auf Quantitäts- schwankungen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Beständigkeit	für die Verwertung/Entsorgung des Industrieklärschlamm in Vietnam ist eine langfristige Lösung vorzuziehen	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kosten																	
<i>Investitionskosten</i>	Kosten sind ein grundsätzliches Thema und oft ausschlag- gebend für Auswahl der Verwertungsoption besonders in kapitalschwachen Entwicklungsländern	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Entsorgungskosten</i>	Unterteilung u. a. in Betriebs-, Wartungs-, Energie-, Lohn- und Transportkosten; für Vietnam sind die Kosten gering zu halten	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Handhabung	der Mangel an Fachkräften und die geringe schulische Aus- bildung erfordern eine einfache Handhabung für die optima- le Verwertungslösung in Vietnam	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Quelle ergänzt und verändert nach SHAMMAS & WANG (2008) und SPERLING et al. (2005b)

Anhand der Zusammenfassung der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen wird deutlich, dass besonders die **landwirtschaftliche Verwertung** sich als geeignet für die vorliegenden Randbedingungen in Vietnam anbietet. Die positiven Effekte auf den Boden, die Langzeitlösung für die Verwertung, die geringen Kosten, die Eignung für jede Kläranlagengröße sowie die Einsparungen von Mineraldünger sind nur einige Punkte, die derzeit für eine landwirtschaftliche Klärschlammentsorgung in Vietnam sprechen.

Auch die **Forstwirtschaft** stellt sich als eine attraktive Verwertungsmöglichkeit dar. Für diese Verwertung fehlen allerdings in Vietnam gänzlich die Erfahrungen. Vorerst wird daher diese Verwertungsoption nicht näher betrachtet. Die **Rekultivierung und der Landschaftsbau** sind nach der obigen Analyse ebenfalls als geeignet für die Klärschlammverwertung in Vietnam einzustufen. Da zurzeit aufgrund der wenigen umgesetzten Projekte in diesen beiden Bereichen kaum Einsatzmöglichkeiten bestehen und sich somit keine Perspektive für eine langfristige Entsorgung bietet, sind die beiden Möglichkeiten für die anfallenden Industrieklärschlamme momentan in Vietnam nicht realisierbar und aus der näheren Betrachtung zu streichen.

Die hohen Kosten, das technisch aufwendige Verfahren, das ausgebildetes Fachpersonal benötigt, und zu wenige Verbrennungsöfen machen eine **thermische Verwertung** als Verwertungsoption für Vietnam unrentabel, besonders die Monoverbrennung. Die im Industrieklärschlamm ggf. enthaltenen hohen Konzentrationen an Schwermetallen und organischen Schadstoffen, die weiten Distanzen zu geeigneten landwirtschaftlichen Flächen und die eingeschränkten Kapazitäten der existierenden Deponien begünstigen im großstädtischen Raum von Vietnam allerdings die Mitverbrennung, die sich speziell für Großklärwerke anbietet (SPERLING et al. 2005b).

Die **Deponierung** sollte, wenn möglich, in Vietnam vermieden werden. Die geringen Deponiekapazitäten, die fehlenden Gas- und Sickerwasserreinigungsanlagen sowie die nicht genutzten Ressourcen des Klärschlammes sind deutliche Nachteile dieser Option. Bei Engpässen oder bis zur Umsetzung der anderen Verwertungsoptionen ist die Klärschlammdeponierung als Zwischenlösung möglich.

Für die **Kompostierung** sprechen besonders die einfache Handhabung, die Anpassung des Verfahrens an verschiedene Kläranlagengrößen sowie die nach SCHULENBURG (2012) bereits existierenden Kompostierungsanlagen. Da der Klärschlammkompost sinnvollerweise in der Landwirtschaft oder dem Gartenbau eingesetzt werden sollte, wird die Kompostierung in den nächsten Kapiteln als Behandlungstechnologie betrachtet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die weiter zu betrachtenden Verwertungsoptionen mit ihrer zentralen/dezentralen Eignung dargestellt.

Tabelle 2-11: Zentrale/dezentrale Eignung der ausgewählten Verwertungsoptionen für Vietnam

Verwertungsoption	zentral	dezentral
Landwirtschaft	geeignet	geeignet
Mitverbrennung	geeignet	eingeschränkt
Deponierung (Zwischenlösung)	geeignet	geeignet

Die Verwertung und Entsorgung von Industrieklärschlamm bestimmt die Auswahl der an die Abwasserreinigung anschließenden Klärschlammbehandlungsschritte. Hierfür gibt es kein allgemein gültiges Schema, sondern nach einer umfangreichen Situationsanalyse sollte hier eine Einzelfallentscheidung anhand von aufgestellten Kriterien getroffen werden.

2.6.4 Angepasste Technologie für die Industrieklärschlammbehandlung

Eine angepasste Technologie soll laut NUSCHELER (2012), die technologischen Bedürfnisse und Fähigkeiten der Entwicklungsländer berücksichtigen, die durch die Kernprobleme Kapitalmangel, Arbeitslosigkeit und geringes technisch-wissenschaftliches Know-how gekennzeichnet sind. Die Situationsanalyse hat diese Kernprobleme gleichermaßen für Vietnam hervorgehoben und bestätigt die daraus abgeleiteten Zielkriterien. Bei der Auswahl der in Vietnam einzusetzenden Technologie ist demnach die Anpassung an die örtlichen Bedürfnisse und Gegebenheiten gefordert (FACH 2013).

Die aus der Landwirtschaft stammenden Arbeitskräfte, benötigen keine kapitalintensive und arbeitssparende Importtechnik, sondern eine Technologie, deren Maschinen und Prozesstechnik einfach betrieben und gewartet werden können ohne ein spezielles Training oder Ausbildung zu erfordern (LOUVEN 1982, NUSCHELER 2012). Der Kapitalmangel in Vietnam führt zur Auswahl einer kostengünstigen Technologie und, wenn möglich, der Nutzung von lokal verfügbaren Ressourcen (keine ausländischen Ersatzteile) und Energiequellen (CHF 1979, LOUVEN 1982). Demnach sollte Maschinentechnik durch die günstig zur Verfügung stehenden menschlichen Ressourcen ersetzt und dadurch Arbeitsplätze geschaffen werden.

FISCHEDICK & ELLENBECK (2004) fordern von einer angepassten Technologie weiterhin:

- Umweltfreundlichkeit
- Flexibilität
- hohe gesamtwirtschaftliche Produktivität
- Anpassung an die spezifischen klimatischen Bedingungen
- Minimierung kultureller Zerrüttung und

- Herstellung von Produkten, die Bedürfnisse der Masse der Bevölkerung dienen und für sie erschwinglich sind.

Viele der hier von den Autoren aufgezählten Kriterien sind bereits in den Nachhaltigkeitskriterien von SuSANA (2008) enthalten oder aus der für Vietnam durchgeführten Situationsanalyse hervorgegangen. Da es keine allgemein gültige Lösung für eine angepasste Technologie gibt, dienen die Nachhaltigkeits- und Zielkriterien im weiteren Vorgehen als Anhaltspunkte für die Auswahl der Behandlungstechnologien. Diese sind im Einzelfall zur vorherrschenden Situation und mit Kenntnis der genauen Umstände vor Ort zu prüfen und anzupassen (BISCHOF 2008, LOUVEN 1982). Ein aktives Mitwirken der lokalen Bevölkerung bei den Forschungsaktivitäten am jeweiligen Einsatzort der Technologie schafft höhere Akzeptanz und führt zu einer erfolgsversprechenden Umsetzung (LOUVEN 1982).

Auf Basis dieser Erkenntnisse sind fünf Technologievarianten ausgewählt worden. Nachfolgend werden deren Vorteile für eine Anwendung in Vietnam erläutert und die Nachteile, die eine Anpassung der Technologie an die vorherrschenden Rahmenbedingungen erschwert, beschrieben.

Kompostierung

In Mieten mit natürlicher und künstlicher Belüftung oder in Reaktoren mit permanenter Umschichtung wird bei der Kompostierung organisches Material durch mikrobielle, exotherme Umsetzungsprozesse in ein marktfähiges Endprodukt überführt. Bei diesen exothermen Umsetzungsprozessen wird nicht nur die organische Substanz stabilisiert, sondern gleichzeitig ein humusähnliches Endprodukt ohne nachweisbare pathogene Mikroorganismen hergestellt, das als Bodenverbesserer und Dünger eingesetzt werden kann (SPERLING et al. 2005b). Der Kompost enthält viel organische Substanz sowie Nährstoffe und verbessert sowohl die Bodenstruktur als auch die Kationenaustauschkapazität, was eine Kompostverwertung in Landwirtschaft, Rekultivierung, Garten- und Landschaftsbau, der Forstwirtschaft und der thermischen Verwertung erlaubt (SHAMMAS & WANG 2007a, KROGMANN 2001).

Weitere Vorteile, die für einen Einsatz dieser Technologie in Vietnam sprechen, sind neben den bereits vorhandenen Kompostierungsanlagen und teilweise existierenden Absatzmärkten (SCHULENBURG 2012, WORLDBANK 2013), die verhältnismäßig geringen Investitionen sowie die niedrigen Betriebs- und Wartungskosten im Vergleich zur thermischen Verwertung (KROGMANN 2001, SPERLING et al. 2005b). Zudem ist die Kompostierung als Stabilisierungsverfahren mit Rohschlamm als auch mit Faulschlamm durchführbar und kann für mehrere in den Industriezonen anfallende Stoffströme (Bioabfall, Grünschnitt, etc.) genutzt werden. Allerdings ist vorab eine Entwässerung des Klärschlammes auf einen Trockenrückstand von 18-30 % notwendig sowie Zuschlagstoffe (Holzhäcksels, Stroh, Rindenmulch u.a.), die für ein gut durchlüftetes Haufwerk sorgen

(KROGMANN 2001). Nachteilig sind der ggf. hohe Platzbedarf, der eine Umsetzung für eine zentrale Behandlung und Verwertung erschwert, und die möglicherweise auf der Kompostierungsfläche entstehenden Gerüche und Bioaerosole (KROGMANN 2001). Die Abbildung 2-17 zeigt ein typisches Fließschema einer belüfteten Mietenkompostierung sowie die anschließende stoffliche Verwertung.

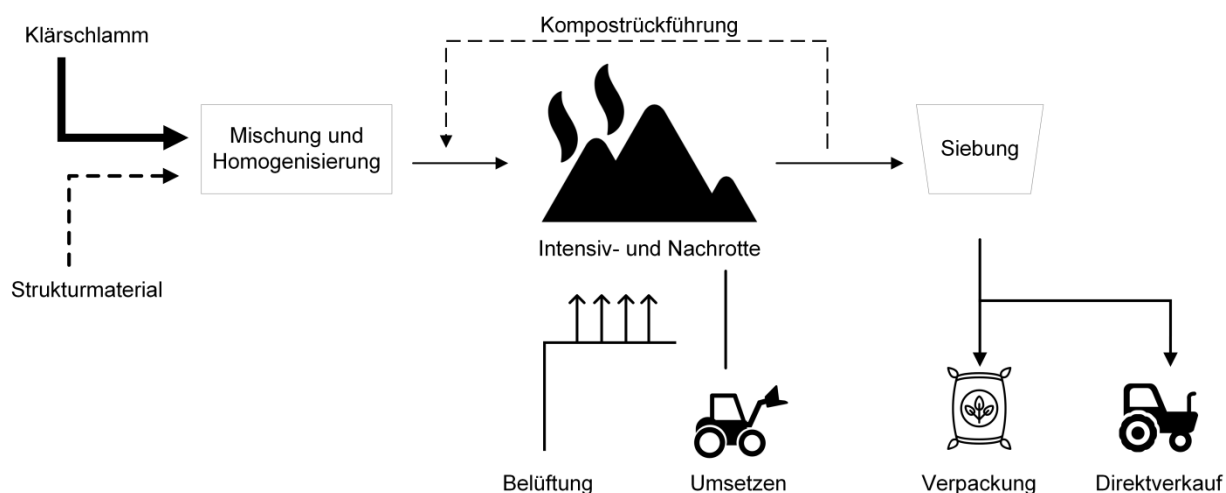


Abbildung 2-17: Schema einer Kompostierungsanlage mit anschließender landwirtschaftlicher Verwertung

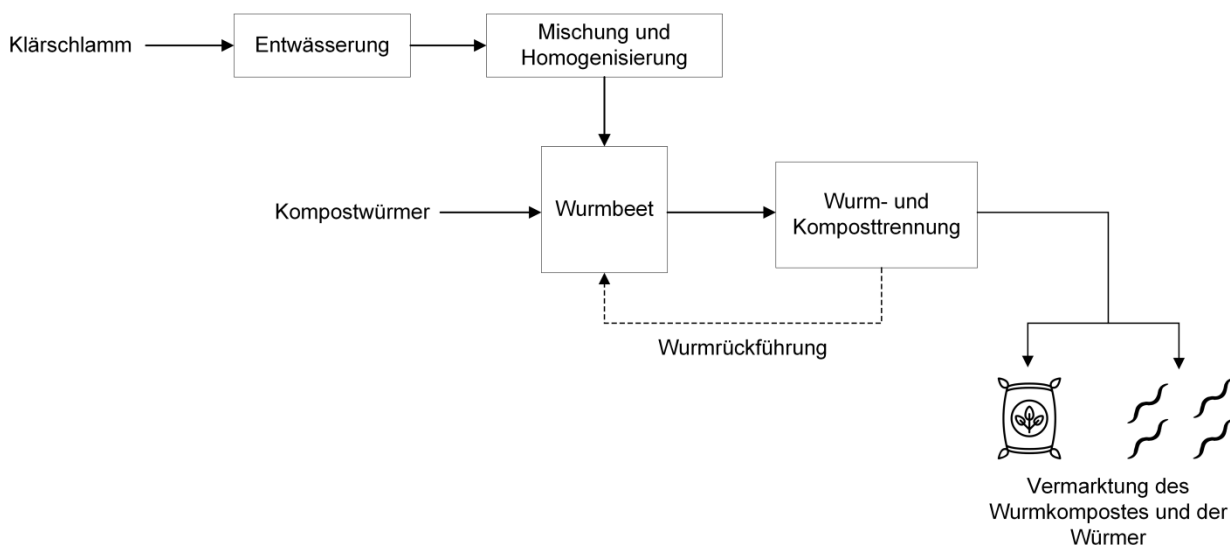
Wurmkompostierung

Als eine Kompostierungsvariante wird in Vietnam laut THANH & MATSUI (2011) bereits die Wurmkompostierung von Kleinunternehmen eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden durch Regenwürmer (*Eisenia fetida*; *Eisenia andrei*, *Eudrilus euginae* u. a.) aerobe Verhältnisse geschaffen, die dazu beitragen die organische Substanz besser und schneller abzubauen. Dieses geschieht sowohl mit kommunalen als auch industriellen organischen Abfällen rasch und geruchlos auf einem wirtschaftlich umsetzbaren, gesellschaftlich akzeptierten und nachhaltigem Weg (SINHA et al. 2011). Relevant für die Technologieauswahl in Vietnam ist zusätzlich die Bioakkumulation in den Kompostwürmern, die in ihrem Körper Schwermetalle und Chemikalien aufnehmen und so dem Kompostmaterial entziehen. Zudem wirken die antibakteriellen Ausscheidungen der Regenwürmer desinfizierend, was zu einer niedrigen Konzentration an pathogenen Mikroorganismen führt (SINHA et al. 2011, OTTERPOHL & BUZIE 2013).

Wurmkompost hat einen humusähnlichen Geruch, ist bräunlich grau und weist Granulare von 0,5-3 mm auf (WANG et al. 2007a). Im Gegensatz zum herkömmlichen Kompost ist der Wurmkompost im Volumen weitergehend reduziert und reichhaltiger an Nährstoffen, weshalb er sich hervorragend als Dünger und Bodenverbesserer eignet (SINHA et al. 2010, SINHA et al. 2011). Die Trennung von Wurmkompost und Regenwürmern kann mit Kompostierern oder Trommelsieben erfolgen, wenn überhaupt notwendig (WANG et al. 2007a). Während der Wurmkompost anschließend als Dünger vermarktet werden kann, dies hat sich in Vietnam bereits bewährt (THANH & MATSUI 2011), können die Re-

genwürmer als proteinhaltiges Tierfutterergänzungsmittel oder als Köder, gerade in dem stark auf die Fischzucht ausgerichteten Land sinnvoll, verkauft werden (WANG et al. 2007a). Dies allerdings nur, wenn die Schwermetallbelastung in den Würmern durch die Bioakkumulation nicht zu hoch ist.

Die Wurmkompostierung benötigt keine zusätzlichen Chemikalien, keine Wärmezufuhr und geringe bis keine Strommengen, was gerade für dezentrale Schlammbehandlungen einen Vorteil darstellt (Wang et al. 2007a, Sinha et al. 2011). Der relativ große Platzbedarf des Verfahrens kann dagegen zum Ausschluss dieser Technologievariante bei der zentralen Klärschlammbehandlung führen (Wang et al. 2007a). Abbildung 2-18 stellt ein Fließschema einer Wurmkompostierungsanlage mit den Verwertungsoptionen der Endprodukte dar.



Quelle verändert nach WANG et al. (2007a)

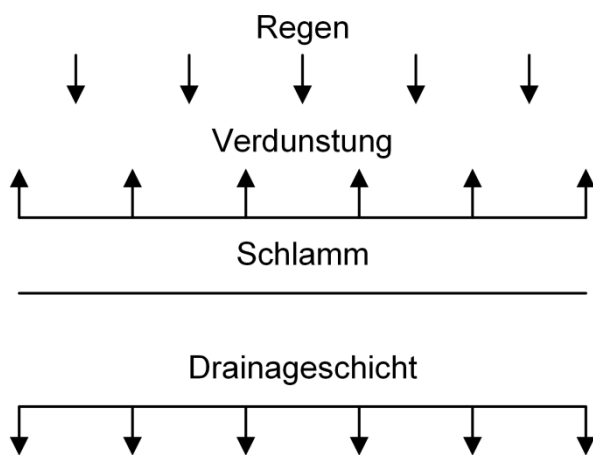
Abbildung 2-18: Fließschema einer Wurmkompostierungsanlage

Trockenbeete

Trockenbeete werden weltweit aufgrund der einfachen Handhabung und der geringen Kosten zur Entwässerung und Trocknung von Klärschlamm eingesetzt. Da besonders in Industriezonen Klärschlamm anfällt, der aufgrund seiner Inhaltsstoffe nicht für eine biologische Behandlung geeignet ist, sind Trockenbeete eine sinnvolle Alternative. Mit der ebenfalls Klärschlämme entwässert werden können, die als gefährlicher Abfall eingestuft worden sind.

Ausgestattet sind die konventionellen Trockenbeete mit einer Drainageschicht aus Kies (9,5-25 mm) sowie darüber einer Drainageschicht aus Sand (0,3-1,2 mm) (SPERLING et al. 2005b). Um die Trockenbeete vor klimatischen Einflüssen zu schützen, das Erscheinungsbild auf der Kläranlage zu verbessern und die Geruchsentwicklung sowie die Insekten zu kontrollieren, bietet sich zusätzlich eine Überdachung an (WANG et al. 2007b). Abbildung 2-19 zeigt den Aufbau und Entwässerungsprozess eines konventionellen

Trockenbeetes und die Ausführung der Trockenbeete auf der Kläranlage Bac Ninh, Vietnam.



Quelle verändert nach WANG et al. (2007b); Foto: Heinrich (2014)

Abbildung 2-19: Schema des Entwässerungsprozesses im Trockenbeetsystem und Trockenbeete auf der Kläranlage Bac Ninh, Vietnam

Der zu behandelnde Klärschlamm wird in Rinnen oder Rohren auf die Sandschicht der Trockenbeete geleitet, wenn möglich nicht gepumpt, da dieser Vorgang die Schlammflocken zerkleinert und eingeschlossenes Gas entspannt (NEBIKER 1965). Die Schlammmenge bzw. Schlammschicht wird durch den zu entwässernden Schlamm bestimmt, üblich sind in gemäßigten Breiten Schichthöhen von ca. 20-30 cm (NEBIKER 1965, WANG et al. 2007b). Mindestens zwei Trockenbeete, die in einem Batchverfahren betrieben werden, sind bei der Auslegung der Klärschlammmentwässerung einzuplanen (SPERLING et al. 2005b).

In den ersten drei Tagen erfolgt die Entwässerung durch die Versickerung des im Schlamm enthaltenen Wassers, dies kann zu einem Trockenrückstandsgehalt von bis zu 15-25 % führen. Durch die anschließende Evaporation wird ein Trockengehalt von bis zu 60 % erreicht (WANG et al. 2007b).

Die Schlammmentnahme erfolgt manuell mit Schaufel und Schubkarre oder maschinell mit Radladern, die Breite der einzelnen Beete bestimmt hierbei die Art der Ausräumung (NEBIKER 1965, WANG et al. 2007b). Das Sickerwasser wird aufgefangen und zur Behandlung in eine Kläranlage eingeleitet. Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Investitionskosten, der geringe Betriebsaufwand, die einfache Handhabung ohne notwendiges Fachwissen, der niedrige Stromverbrauch, Unempfindlichkeit gegenüber Schwankungen in der Schlammquantität und kein Chemikalienverbrauch (WANG et al. 2007b). Zu den Nachteilen zählen der größere Platzbedarf gegenüber den mechanischen Entwässerungsverfahren, die Notwendigkeit bei einer stofflichen Nutzung den Schlamm vorab zu stabilisieren, das Geruchspotential sowie der hohe Arbeitsaufwand bei der Schlammmentnahme (TUROVSKIY & MATHAI 2006).

Klärschlammvererdung

Die Klärschlammvererdung ist eine Weiterentwicklung der konventionellen Trockenbeete bei der sowohl die Versickerung aufgrund der Gravitation als auch die Evapotranspiration von Pflanzen zur Entwässerung genutzt wird. Der Aufbau der Vererdungsbeete besteht aus einer mehrschichtigen Drainage mit einer nach unten aufsteigenden Durchschnittskorngröße, ähnlich wie bei den Trockenbeeten (TUROVSKIY & MATHAI 2006).

Die Schilfpflanzen (*Phragmites communis*), die hauptsächlich zur Klärschlammvererdung eingesetzt werden, sind in Vietnam heimisch. Sie werden in die Sandschicht gepflanzt und halten aufgrund ihres Wurzelsystems die Wasserleitfähigkeit des Bodenkörpers aufrecht (TUROVSKIY & MATHAI 2006). Zudem werden durch das Wurzelsystem aerobe Zonen und günstige Lebensräume für die Mikroflora geschaffen, die eine Belüftung und Umsetzung der Schlamminhaltsstoffe und damit eine Volumenreduzierung garantieren (JORDAN 2006, TUROVSKIY & MATHAI 2006). Die durch Wind erzeugte Drehbewegung der Halme fördert zusätzlich eine oberflächige Rissbildung, die neue Drainkanäle schafft und die Schlammoberfläche für die Verdunstung vergrößert (JORDAN 2006). Die Abbildung 2-20 zeigt die verschiedenen Phasen der Klärschlammvererdung über einen Beetzyklus (ca. 8-10 Jahre).

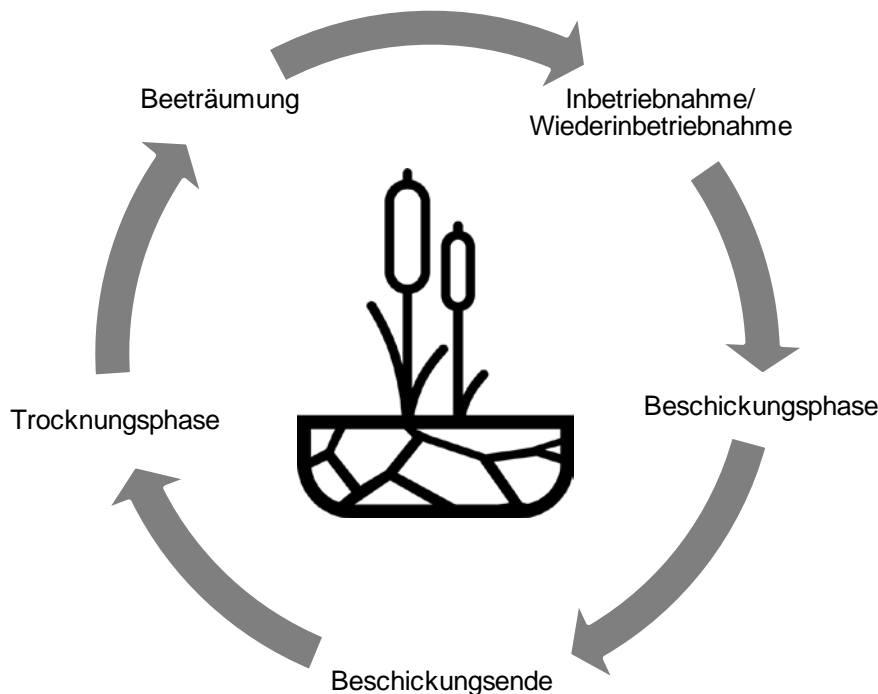


Abbildung 2-20: Zyklusphasen eines Klärschlammvererdungsbeetes

Die Beschickung der Vererdungsbeete erfolgt auf die gleiche Weise wie bei Trockenbeeten, üblicherweise über 24 Stunden und ganzjährig, allerdings werden diese nach

einer Beschickungspause (1-2 Wochen) erneut mit einer Schlammsschicht gefüllt (JORDAN 2006, TUROVSKIY & MATHAI 2006). Das Sickerwasser wird zur Reinigung zurück in die Kläranlage geleitet. Vererdungsbeete können bis zu 10 Jahren beschickt werden, dann folgt eine Ruhephase (Trocknungsphase) von bis zu einem Jahr, in der die untere Schlammsschicht mineralisiert und desinfiziert wird (JORDAN 2006). Bei der Räumung werden Radlader eingesetzt, die sowohl die Schlammsschicht als auch die Drainage entfernen (TUROVSKIY & MATHAI 2006). Auch dieses Verfahren ist kostengünstig zu installieren, einfach und kosteneffektiv zu betreiben (HUNG et al. 2010). Die Klärschlammvererdung benötigt keine Chemikalien, weist eine hohe Entwässerungsleistung auf und produziert ein humusähnliches Endprodukt, welches sich gut als Dünger in der Landwirtschaft eignet (JORDAN 2006). Als Nachteil ist ebenfalls der hohe Platzbedarf zu sehen, der ggf. im großstädtischen Raum und innerhalb der Industriezonen nicht zur Verfügung steht (HUNG et al. 2010).

Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Die Klärschlammfaulung zählt zu den ältesten biologischen Stabilisierungsverfahren und wird häufig auf mittleren bis großen Kläranlagen eingesetzt. In Abwesenheit von Sauerstoff wird bei der anaeroben Stabilisierung die organische Substanz im Klärschlamm durch Mikroorganismen umgesetzt (TUROVSKIY & MATHAI 2006) und es entstehen prinzipiell die Endprodukte Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2), Wasser und stabilisierte organische Reststoffe (TARICKSKA et al. 2007).

Die Effektivität und die Stabilität der anaeroben Klärschlammstabilisierung variiert unmittelbar mit den Charakteristika des Rohschlammes und den Randbedingungen im Faulbehälter, weshalb eine Vorbehandlung und Eindickung des Rohschlammes empfohlen wird. Gerade bei Industrieklärschlamm können Hemmstoffe, wie Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, chlororganische Stoffe und nicht abbaubare anionische Reinigungsmittel, den anaeroben Abbau zum Erliegen bringen (SPERLING et al. 2005b).

Zu den Vorteilen des Verfahrens zählen ein weitergehender Abbau der organischen Substanz (30-65 % der im Rohschlamm enthaltenen Feststoffe) und die Produktion von Biogas (60-70 Vol.-% Methan, 30-40 Vol.-% CO_2), das für Gebäudeheizung, Belüftung oder die Erzeugung von Strom und Wärme im Blockheizkraftwerk eingesetzt werden kann (TARICKSKA et al. 2007, TUROVSKIY & MATHAI 2006). Des Weiteren ist die Massenreduktion des Klärschlammes mit einer verbesserten Entwässerbarkeit verbunden und einer Zerstörung vieler pathogener Mikroorganismen (TARICKSKA et al. 2007). Faulschlamm ist im Allgemeinen frei von unangenehmen Gerüchen und enthält Stickstoff, Phosphor sowie organische Substanz, die die Struktur und Fruchtbarkeit von Böden verbessert (DOHANYOS & ZABRANSKA 2001, TUROVSKIY & MATHAI 2006).

Ein Nachteil, der auch in Vietnam zu Schwierigkeiten in der Umsetzung führen kann, sind die hohen Investitionskosten, die für den Bau und die Ausrüstung (Beschickungs-

pumpen, Wärmetauscher und Rührsystem) der Faulbehälter anfallen (TUROVSKIY & MATHAI 2006). Die hohe Rückbelastung durch das Eindicken und Entwässern der Faulschlämme und die Empfindlichkeit der beteiligten Mikroorganismen gegenüber Veränderungen der Randbedingungen sind bei der Verfahrenswahl zu bedenkende Nachteile. Aber die Möglichkeit mit dieser Technologie die Energieversorgung für Klärwerke sicherzustellen, ist entscheidend für die Auswahl dieser Technologie. Zumal die vietnamesische Regierung künftig die erneuerbaren Energieträger verstärkt fördert (1208/QD-TTg, 21. Juli 2011) und bereits über die letzten Jahre mit Unterstützung einer niederländischen Entwicklungsorganisation kleine Biogasanlagen im ländlichen Raum gebaut worden sind (NGUYEN et al. 2014, VOSS & KOSSMANN 2012). Mittlere bis größere Biogasanlagen sind derzeit noch kaum umgesetzt (VOSS & KOSSMANN 2012). Im Abwasserbereich hat die Kläranlage Yen So in Hanoi vietnamweit die einzige anaerobe Klärschlammstabilisierung, die allerdings mit zu niedrigen CSB-Konzentrationen im Klärschlamm nicht effizient funktioniert (WORLDBANK 2013).

VOSS & KOSSMANN (2012) und NGUYEN et al. (2014) sehen großes Biogaspotenzial in der Landwirtschaft, Agrarindustrie sowie den Haushaltsabfällen. Viele dieser Abfallströme fallen in den vietnamesischen Industriezonen an und könnten gemeinsam mit dem anfallenden Klärschlamm (Co-Vergärung) als Energieressource genutzt werden. Die nachfolgende Abbildung stellt ein typisches Verfahrensschema einer Schlammfaulungsanlage dar.

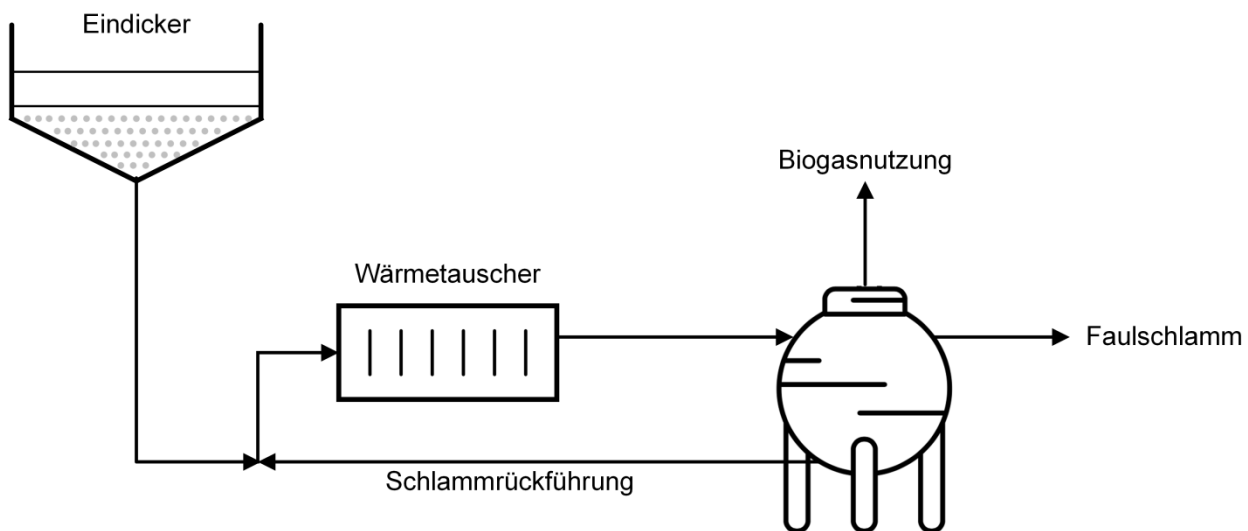


Abbildung 2-21: Verfahrensschema einer anaeroben Klärschlammstabilisierung

Je nach Bedarf können die ausgewählten Technologievarianten miteinander kombiniert werden, um die notwendigen Behandlungsziele für die Verwertungsoptionen zu erreichen (siehe Tabelle 2-12). Hierzu zählen die Volumenreduzierung durch Eindicken, Entwässern, Konditionieren und Trocknen sowie die Stabilisierung und die Desinfektion.

Da in den Vietnamesischen Standards bis dato noch keine Grenzwerte für die landwirtschaftliche Ausbringung von Klärschlamm festgelegt wurden, wird hier als Anhaltspunkt

die deutsche Klärschlammverordnung (AbfKlärV) herangezogen. In Deutschland hat zwar zur Vereinheitlichung der Gesetzgebung ab dem 01.01.2015 die Düngemittelverordnung eine Vorrangstellung gegenüber der Novelle der ABFKLÄRV (2012), aber da für ein Entwicklungsland - wie Vietnam - die Grenzwerte realistisch gesetzt und langsam angepasst werden sollten, bieten die Grenzwerte der Novelle der ABFKLÄRV (2012) einen geeigneten und realistischen Ansatz für die stoffliche Verwertung innerhalb Vietnams. Natürlich immer unter dem Vorbehalt, dass keine Gefährdung für den Menschen, die Tiere und die Umwelt entstehen.

Tabelle 2-12: Notwendige Behandlungsschritte und Klärschlammcharakterisierung in Bezug auf die ausgewählten Verwertungswege in Vietnam

Kriterien	Landwirtschaft	Kompostierung	Mitverbrennung	Deponierung	gefährlicher Abfall
Stabilisierung	erforderlich	möglich			
<i>Stabilisierungsgrad</i>	voll ¹ bis bedingt ² stabilisiert		teilstabilisiert	bedingt bis teilstabilisiert	
Entwässerung	möglich	erforderlich	erforderlich	erforderlich	
Trocknung			erforderlich		
notwendiger Trockenrückstand [%]	3-6 ¹ 30 ²	18-30 ³	>25-35	>15-32	
Arsen [mg/kg]					40 ⁴
Cadmium [mg/kg]	3	3			10 ⁴
Chrom [mg/kg]	120	120			100 ⁴
Blei [mg/kg]	150	150			300 ⁴
Nickel [mg/kg]	100	100			1.400 ⁴
Kupfer [mg/kg]	800	800			
Zink [mg/kg]	1.800	1.800			5.000 ⁴
AOX [mg/kg]	400	400			

Kriterien	Landwirtschaft	Kompostierung	Mitverbrennung	Deponierung	gefährlicher Abfall
PCB [je Kongener]	0,1	0,1			
Dioxine [ng]	30	30			
Phenol [ppm]					20.000 ⁴
Heizwert [MJ/kg TR]			9-12		

¹ ohne Entwässerung ² mit Entwässerung ³ ohne Zuschlagstoffe ⁴ QCVN50:2013/BTNMT, Einheit [ppm]; Quelle: KROGMANN (2001); SPERLING et al. (2005b); DICHTL (1984); ABFKLÄRV (2012)

Hinsichtlich der Entseuchung darf nach der Novellierung der AbfKlärV der Klärschlamm in 50 g Nasssubstanz keine Salmonellen und keine entwicklungsfähigen Spulwurmeier (Askariden) enthalten. In den vietnamesischen Richtlinien sind für die pathogenen Mikroorganismen derzeit keine Grenzwerte für Klärschlamm vorhanden.

2.7 Darstellung von geeigneten Alternativen für vietnamesische Industriezonen

Aus den geeigneten Verwertungs- und Entsorgungsoptionen wurden in Kombination mit den ausgewählten Technologien umsetzbare Technologievarianten erarbeitet, die in Abbildung 2-22 dargestellt sind.

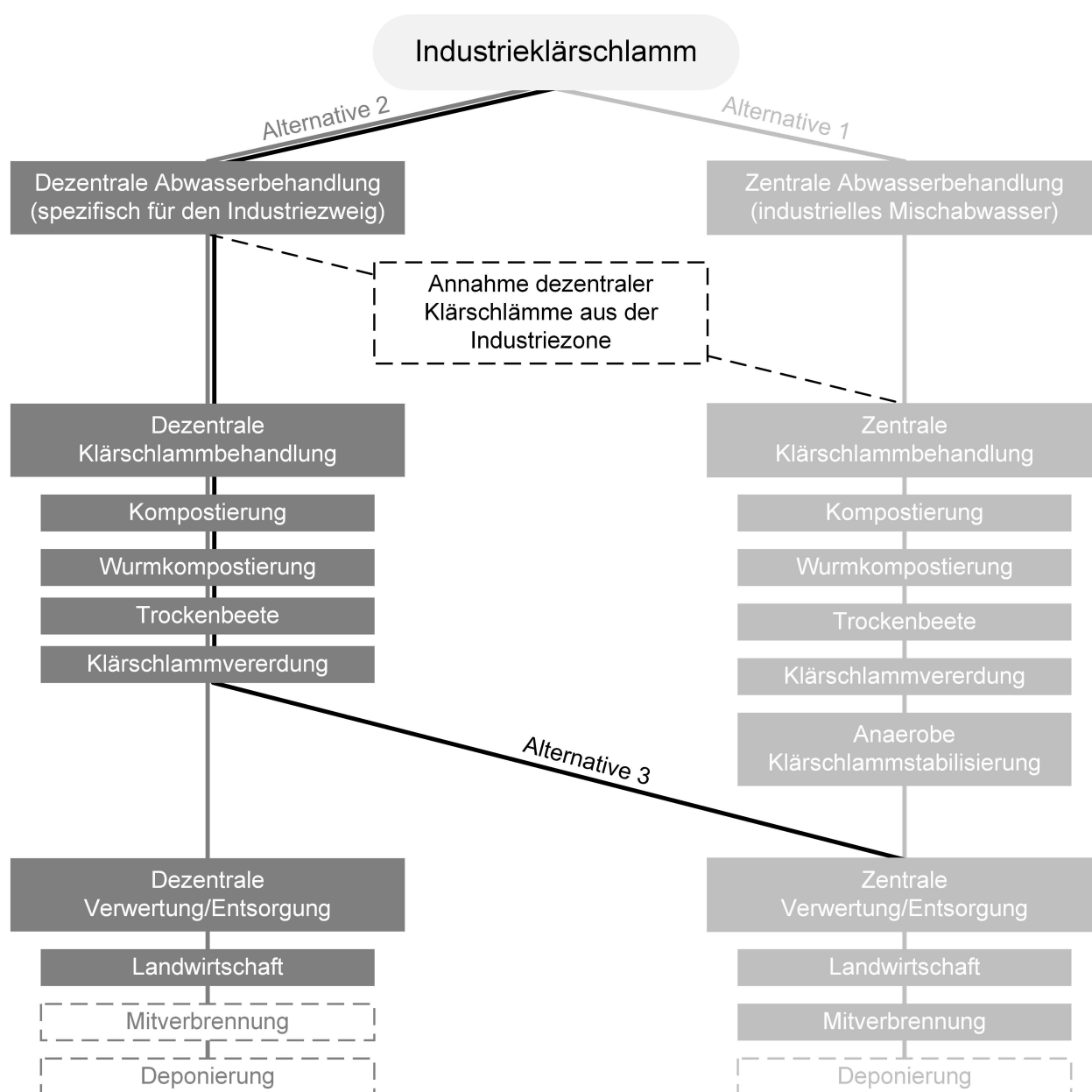


Abbildung 2-22: Umsetzbare Technologievarianten für die vietnamesischen Industriezonen

Als nächster Schritt bei der Konzepterstellung werden als Auswahlmethode Massenbilanzen bzw. Stoffstromanalysen eingesetzt, die den Stoffhaushalt eines vorab definierten Systemraumes erfassen, beschreiben und interpretieren sollen. Der Systemraum des Landes Vietnam wird als zu umfassend erachtet und führt im Einzelfall zu keiner konkreten und umsetzbaren Lösung. Darum werden nachfolgend anhand einer Fallstudie in der Industriezone Tra Noc, Vietnam, die aufgestellten Technologievarianten im Einzelfall an Fallbeispielen geprüft. Durch die Datenerfassung, die in der Industriezone Tra Noc durchgeführt worden ist, besteht die Möglichkeit, Stoff- und Energieströme darzustellen, die als Basis für Lösungsansätze dienen. Bestehende Lösungsansätze für konkrete Fallbeispiele können anhand dieser bewertet und einfacher übertragen werden. Ziel ist es, eine Übertragung nicht nur für vietnamesische Industriezonen, sondern auch andere Systemräume zu schaffen.

3 Fallstudie Industriezone Tra Noc, Vietnam

Die Stadt Can Tho liegt im größten landwirtschaftlichen Produktionsgebiet von Vietnam, dem Mekong Delta, das als „Reisschüssel“ des Landes bekannt ist. Neben Reis produziert die Region Früchte, Gemüse sowie Fischerei- und Aquakulturerzeugnisse, weshalb der wichtigste Industriesektor die Lebensmittelindustrie ist. Weiterhin sind in der Region die Herstellung von Textilien, Baustoffen, Düngemitteln, Pestiziden, Saatgut und die damit verbundenen Industriezweige zur Produktion von Anlagenteilen und Maschinen vertreten (GARSCHAGEN et al. 2012).

Diese Industrieunternehmen sind oft hoch konzentriert in Industriezonen, wie der Industriezone Tra Noc, Can Tho, angesiedelt worden, denn sie benötigen Produktionsfläche, durchgängige Wasser- und Energieversorgung sowie ausreichend Arbeitskräfte und eine gute Verkehrsanbindung (GARSCHAGEN et al. 2012). Mit dem Ausbau von Industriezonen sollen laut der vietnamesischen Regierung Anreize für nationale und internationale Investoren geschaffen werden. Nicht mit eingeplant in der Regierungsstrategie sind hingegen die anfallenden industriellen Abwässer und Klärschlämme (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010). Von den landesweit gegründeten 219 Industriezonen (2008) betreiben nur 60 ein zentrales Klärwerk (ASIAN DEVELOPMENT BANK 2010) und das, obwohl 60-75 % der in die Gewässer eingeleiteten Schadstoffe von Industrien stammen, die Textilien, Lebensmittel und Fischereiprodukte herstellen (BACH 2004).

Die im Jahr 1999 von vietnamesischen Industrieministerium durchgeführte Situations-einschätzung der Umweltverschmutzung durch industrielle Tätigkeiten zeigte deutlich, dass die meisten Abwasserströme schädlich für die Gewässer und menschliche Gesundheit sind (BACH 2004). Trotz der danach eingeführten Regulierungen zur Kontrolle und Behandlung des in Industrien anfallenden Abwassers, hat sich wenig verändert. Ganz im Gegenteil, die Industriezone Tra Noc I beispielsweise, die seit 1994 besteht, wurde 2000 um das Areal Tra Noc II erweitert, aber das anfallende Industrieabwasser weiterhin ungereinigt direkt in den angrenzenden Seitenarm des Mekongs, den Fluss Hau, eingeleitet (NGUYEN 2010b, NGA et al. 2008). Der Regierungsplan für die sozio-ökonomische Entwicklung der Stadt Can Tho sieht sogar bis 2020 noch weitere Industriezonen für die Region vor, die die Umweltsituation noch weiter verschärfen werden. Es besteht also ein erheblicher Nachholbedarf in der Abwasserreinigung und der damit verbundenen Klärschlammbehandlung, die bis jetzt nur in Einzelfällen realisiert werden konnten (POGADE & SCHARFE 2012).

3.1 Situationsanalyse für die Industriezone Tra Noc

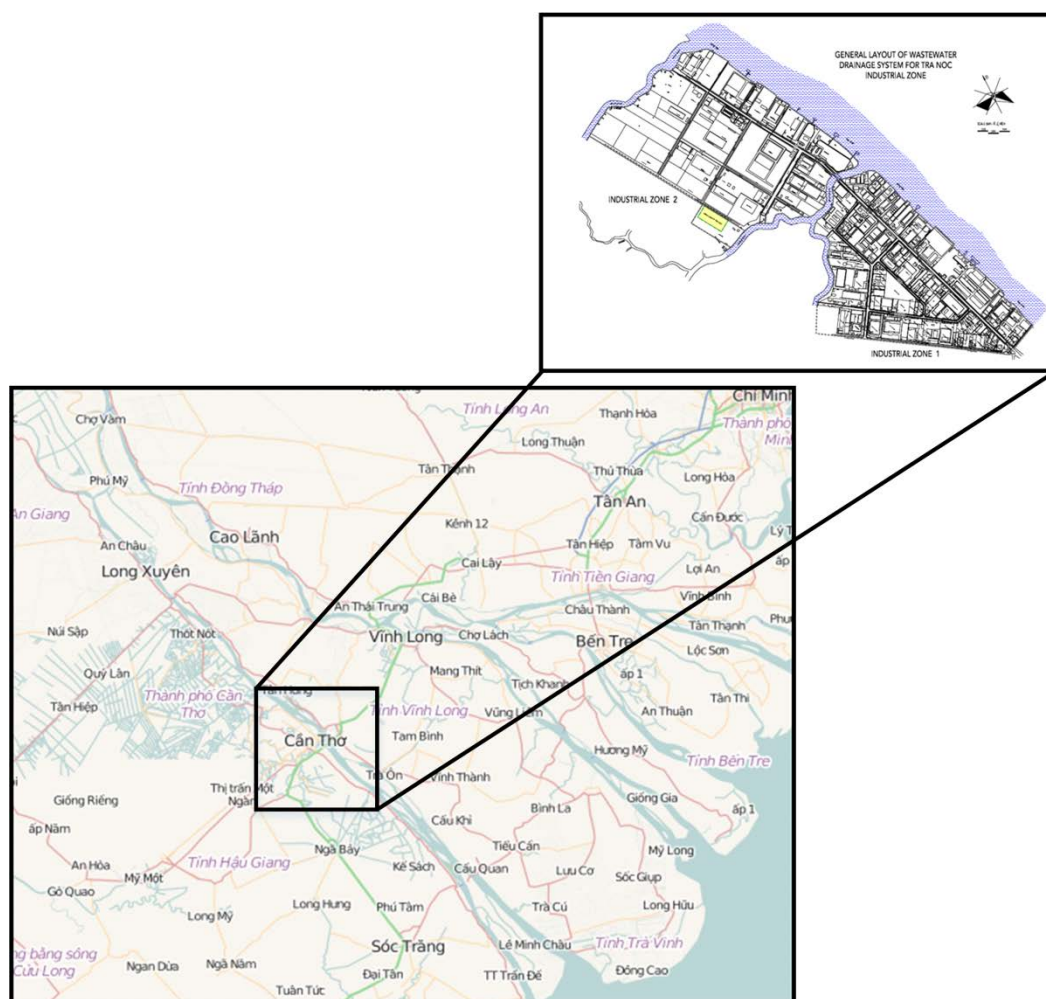
Um die vorliegende Fallstudie der Industriezone Tra Noc aus verschiedenen Perspektiven betrachten zu können, die Einflussfaktoren und die Zusammenhänge richtig zu er-

mitteln und die Interessensgruppen zu identifizieren, ist die allgemeine Situationsanalyse für Vietnam anzupassen und zu verfeinern. Die Ergebnisse aus der angepassten Situationsanalyse dienen als Grundlage für das weitere Vorgehen und die Erstellung von Lösungsansätzen für die aus der Industriezone Tra Noc ausgewählten Fallbeispiele.

3.1.1 Umfeldanalyse

Geographische Rahmenbedingungen

Gelegen im Herzen des Mekong Deltas im Süden von Vietnam, wird die Stadt Can Tho und die zum Stadtgebiet gehörende Industriezone Tra Noc durch einen Seitenarm des Mekongs, den Fluss Hau, begrenzt (siehe Abbildung 3-1), der die Region sehr stark durch ein System aus Nebenströmen und Kanälen prägt (TRI 2012).



Quelle: ©OpenStreetMap-Mitwirkende; CIPCO (2013)

Abbildung 3-1: Geografische Lage von Can Tho und der Industriezone Tra Noc

Das Klima ist, wie in der 160 km entfernten Stadt Ho Chi Minh, tropisch und durch den südwestlichen indischen und den nordwestlichen pazifischen Monsun stark beeinflusst, weshalb die Regenzeit (Mai bis November) in eine Trockenzeit (Dezember bis April) übergeht (HUNG et al. 2012). Das humide Tropenklima äußert sich in einer hohen Luft-

feuchtigkeit von rund 80 %, beständig hohen Temperaturen zwischen 25-34°C sowie reichlich Niederschlag 1.500-1.800 mm (Deutschland im Durchschnitt 720 mm) (GLADEBECK 2014, OZAKI et al. 2014, DWD 2015). Der Mekong transportiert etwa 90 % der Durchflussmenge in der Regenzeit. Dies führt von Juni bis November zu Hochwasser und Überflutungen in großen Arealen des Mekong Deltas (ARNOLD 2010).

Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Bevölkerung

Can Tho, die ein Knotenpunkt für Produktion und Handel der im Delta erzeugten Produkte, die politische Verwaltung sowie die sozialen und kulturellen Funktionen ist, hat als einzige Provinz im Mekong Delta eine leicht positive Zuwanderungsrate vorzuweisen (GARSCHAGEN et al. 2012). Laut GSO (2013) leben in der Provinz Can Tho rund 1.222.400 Einwohner auf einer Fläche von 1.409 km². Die Bevölkerungsdichte liegt damit bei 868 Einwohnern/km², die sehr ungleich über die Provinz verteilt sind. Die Bevölkerung setzt sich hauptsächlich aus Vietnamesen (auch *Kinh* genannt, 96,85 %) zusammen, während die anderen ethnischen Gruppen Minderheiten bilden. Vertreten sind: Chinesen (1,4 %), Khmer (1,7 %) und andere (0,05 %) (NGUYEN 2010b). Der Bevölkerungsdurchschnitt ist mit einer Geburtenrate von 1,6 % relativ jung, denn 62 % der Einwohner von Can Tho sind unter 40 Jahre alt (NGUYEN 2010b).

Trotz der jungen Bevölkerung ist das geringe Bildungsniveau der Bevölkerung im Mekong Delta auffällig. Vergleichsweise wenig Jugendliche besuchen eine weiterführende Schule und bloß 9,7 % der Menschen älter 15 Jahre haben eine berufliche oder fachliche Ausbildung innerhalb des offiziellen Bildungswesens abgeschlossen. So ist es nicht verwunderlich, dass die Analphabetenrate mit 8,4 % relativ hoch ist. Oftmals sind hiervon besonders die ethnischen Minderheiten betroffen. Wirtschaftliche Auswirkungen sind vor allem die fehlenden qualifizierten und ausgebildeten Arbeitskräfte, die die Wirtschaft in der Region dringend benötigt. Selbst die Bildung der Unternehmer in den Industriezonen hinsichtlich ihrer Managementfähigkeiten ist bedenklich (GARSCHAGEN et al. 2012).

Wirtschaft

Die sogenannte „Reisschüssel von Asien“ ist besonders für die Reiserzeugung bekannt und weist den höchsten Prozentsatz an landwirtschaftlicher Nutzfläche in Vietnam auf. Die reichen Wasservorkommen des Deltas haben dazu geführt, dass die Fischproduktionsindustrie sich in der Region niedergelassen haben und nun, wie auch die Obst- und Gemüseproduktion der Region (siehe Abbildung 3-2), zur Versorgung der vietnamesischen Bevölkerung und zum Exporthandel beitragen (GLADEBECK 2014, NGUYEN 2010b, HAMAGUCHI & ISHIZUKA 2012, GARSCHAGEN et al. 2012). Die Diversifikation innerhalb des industriellen Sektors hat dadurch stark gelitten und die Region zunehmend abhängiger von der Fisch- und Aquakulturindustrie gemacht (HAMAGUCHI & ISHIZUKA 2012). Bemerk-

bar war diese Entwicklung 2011 als die Rohstoffe der Fisch- und Aquakulturindustrie wegen der wirtschaftlichen Rezession und den schlechten Witterungsverhältnissen fehlten und die Fischverarbeitungsbetriebe in der Industriezone Tra Noc nur noch mit einer Auslastung von 40-50 % produzierten (WORLDPRESS 2011).

Das Mekong Delta ist die drittwichtigste Industrieregion in Vietnam und erwirtschaftet etwa 10 % des nationalen Bruttoinlandsproduktes. Trotzdem konnte seit Mitte der 90iger Jahre des vergangenen Jahrhunderts der relative Anteil an der nationalen industriellen Produktion nicht erhöht werden. Regional erwirtschaftet die Industrie 30 % des Bruttoinlandsproduktes. Dies ist im nationalen Vergleich zu gering und bedeutet, dass der industrielle Sektor nur bis zu einem gewissen Grad die Arbeitskräfte aus dem landwirtschaftlichen Sektor aufnehmen kann, die aufgrund der Intensivierung und Umgestaltung der Landwirtschaft ohne Arbeit sind (GARSCHAGEN et al. 2012).

Provinzen im Nordosten von Ho Chi Minh Stadt profitieren von der Nähe zur Megacity, denn aufgrund von steigenden Kosten im Ballungsraum verlagern Industriebetriebe zunehmend ihre Unternehmen in ländlichere Regionen. Das Mekong Delta profitiert nicht von der Abwanderung der Unternehmen aus Ho Chi Minh Stadt. Die Gründe hierfür sind nicht nur auf dem wirtschaftlichen Sektor zu sehen: eine ungenügende Verkehrsinfrastruktur ins Delta, zu wenig ausgebildetes oder qualifiziertes Personal, weniger fortgeschrittene Lokalbehörden, geringe Investmenterfahrungen, wenig Investoren aus dem privaten Sektor oder Ausland und damit keine Reinvestitionen zur Aufrüstung der vorhandenen Technologie (GARSCHAGEN et al. 2012).



Fotos: Wasielewski (2013)

Abbildung 3-2: Obst- und Gemüsemarkt in Can Tho und die neueröffnete Can Tho Brücke über den Fluss Hau

Erste Schritte im Bereich der Infrastruktur sind mit der Eröffnung der Can Tho Brücke über den Fluss Hau (siehe Abbildung 3-2), die eine direkte Verbindung nach Saigon geschaffen hat, sowie dem Ausbau des Can Tho Flughafens zu verzeichnen. Für die langfristige Entwicklung des industriellen Sektors reicht allerdings eine Basisversorgung der Unternehmen in den Industriezonen nicht aus (GARSCHAGEN et al. 2012). Neben Ener-

gie, Wasser und den Verkehrsanbindungen müssen auch die umwelttechnischen Aspekte bedacht werden, damit die Region für ausländische Investoren von Interesse ist und wirtschaftlich wachsen kann. Zu eng ist die Verknüpfung und Abhängigkeit der Industriezweige untereinander als auch mit der Landwirtschaft, der Wasser- und Bodenqualität, dem gesamten Ökosystem des Mekongs.

Ökologische und gesetzliche Rahmenbedingungen

Wie auch ganz Vietnam ist Can Tho durch die Urbanisation, Industrialisierung und das Bevölkerungswachstum belastet. Zusätzlich wird die Region durch den globalen Klimawandel beeinflusst. Über die letzten Jahre hat sich die durchschnittliche Lufttemperatur um 0,2°C erhöht, die Sonneneinstrahlung stieg um 200 h an, während die Luftfeuchtigkeit um 5 % sank, ebenso wie die durchschnittliche Niederschlagsmenge um 200 mm/a. Der Wasserablauf des Flusses Hau lag nur bei 800 m³/s (30 jähriger Durchschnitt 1.250 m³/s) in der Trockenzeit und verursacht damit Salinität auch weit im Inland (TRINH et al. 2013).

Ein weiteres kritisches Problem ist die Wasserverschmutzung in der Region (TRINH et al. 2013). Im Jahr 2003 hat das Vietnam Environment Monitoring zwar ergeben, dass die Wasserqualität in den Hauptflüssen des Mekongs die festgelegten Standardklassen erreichen, aber bei der Betrachtung der Nebenflüsse und Kanäle, insbesondere in städtischen und industrialisierten Gebieten ist dies nicht der Fall (NGUYEN 2010b). Als Hauptverursacher für die Wasserverschmutzung sind die Bevölkerung, die Aquakultur, Fischerei, die Landwirtschaft und die ansässigen Industrieunternehmen identifiziert worden, die 2008 umgerechnet über 2 Millionen Tonnen an Chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) in den Mekong eingeleitet haben (TRINH et al. 2013, NGUYEN 2010b, WAIBEL et al. 2012).

Da bis heute noch keine zentrale Kläranlage in Betrieb genommen worden ist, werden die kommunalen Abwässer ohne Behandlung in das Flusssystem des Mekongs eingeleitet. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) unterstützt zwar den Bau von mehreren kommunalen Kläranlagen in der Region (Can Tho, Soc Trang und Tra Vinh), aber häufig reichen die Kapazitäten der Anlagen nicht aus, um das gesamte anfallende Abwasser zu reinigen. Die geplante Kläranlage für Can Tho soll alleinig aus einer mechanischen Reinigung für 15.000 Einwohner bestehen (ARNOLD 2010). Der anfallende Klärschlamm und eine Behandlung wurden nicht bedacht.

Es existieren zudem genügend Haushalte direkt am Flusсуfer oder in den ländlicheren Gebieten, die gar nicht ans Abwassernetz angeschlossen sind. Menschliche Ausscheidungen, Müll und Abwasser werden direkt im Fluss oder in den Kanälen entsorgt (siehe Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Verschmutzung eines Abwasserkanals vor der Einleitung in den Fluss Hau sowie Wellblechhäuser mit Latrinen am Can Tho Fluss

Im landwirtschaftlichen und aquakulturellen Sektor kommt es durch den gestiegenen Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln zu einer Wasserverschmutzung. Bereits 2001 wurden über 110.000 t Pestizide und Düngemittel in der landwirtschaftlichen Produktion in Can Tho auf die Reis- und Ackerflächen ausgebracht. Während der Überflutungszeit oder bei starkem Oberflächenabfluss in der Regenzeit werden die Rückstände der Pestizide und Düngemittel ausgewaschen und in die Gewässer gespült. Hierdurch kann es außerdem zu einer Kontamination des Grundwassers kommen (NGUYEN 2010b, WAIBEL et al. 2012).

Für eine weitere Wasserverschmutzung sorgen die Unternehmen aus den Industriezonen. Laut DONRE hat sich nach der Eröffnung der Industriezone Tra Noc und deren Erweiterung die Wasserverschmutzung in den Kanälen und Nebenarmen verschlimmert. Momentan haben 28 Unternehmen eine Abwasservorbehandlungsanlage (NGUYEN 2010b). Die anderen Industriebetriebe leiten aufgrund der noch im Bau befindlichen zentralen Kläranlage ihre Abwässer, täglich ca. 15.000 m³ (INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY VIETNAM 2012), ungeklärt in das Regenwassersystem der Industriezone oder direkt in den Fluss Hau ein (RUDOLPH et al. 2013).

Laut Decision N. 2066/QD-TTg (2010) wird die industrielle Abwassermenge in Can Tho für das Jahr 2015 auf 64.600 m³/d geschätzt. NGUYEN (2010b) geht von einer CSB-Belastung von 67.500 t/d aus, die von den umliegenden Industriezonen und Handwerksdörfern in das Flusssystem um Can Tho eingeleitet werden. Die an die Industriezone Tra Noc angrenzenden Haushalte in Binh Thuy und O Mon haben keine andere Möglichkeit, als das verunreinigte Wasser als Trinkwasser zu nutzen, zudem müssen sie den Gestank und die gesundheitsschädigenden Substanzen im Wasser ertragen (NGUYEN 2010b).

Als weiteres Problem in Bezug auf die Wasserqualität stellt sich der bestehende Rechtsrahmen heraus. Nicht nur zeigen die zuständigen Behörden fehlendes Fachwis-

sen und Verwirrtheit in der Anwendung des Rechtsrahmens, sondern sie setzen die Regularien zur Abwasserbehandlung und Ablaufqualität nicht durch (NGUYEN 2010b, WAIBEL et al. 2012). Arme Landwirte werden nicht bestraft, weil die Geldstrafe ernsthaft deren Existenz gefährden würde. Während reiche Betriebe nicht bestraft werden aufgrund der Spenden, die diese für die Entwicklung der Gemeinde zur Verfügung stellen. Die Unternehmen in den Industriezonen sind hingegen sehr gut informiert, wie sie die gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Abwasserbehandlung umgehen können. Oftmals entscheiden sich die Unternehmen bewusst dafür, die ungeheuerlich niedrigen Strafen zu zahlen, anstatt eine Abwasserreinigung zu bauen, welche die teurere Option darstellt. Selbst wenn die Unternehmen eine Abwasserreinigung errichten, um den Anordnungen der Umweltverträglichkeitsprüfung gerecht zu werden, ist deren Leistungsfähigkeit sehr eingeschränkt (HERBST 2008, WAIBEL et al. 2012).

Zusätzlich haben die Unternehmer eine geringe Zahlungsbereitschaft hinsichtlich der anfallenden Abwasser- und Abfallgebühren und entsorgen, um Kosten zu sparen, Abwässer, Klärschlämme und andere bei der Produktion anfallende Abfälle regelmäßig in den naheliegenden Gewässern (WAIBEL et al. 2012).

Generelle Informationen zur Industriezone

Die Industriezone Tra Noc I wurde unter dem Beschluss des Premierministers, die verstreuten Unternehmensstandorte in Industriezonen zu konzentrieren, gegründet und ist seit 1994 in Betrieb. Für die in 2012 vorhandenen 120 Unternehmen wurden 135 ha Industriefläche zur Verfügung gestellt, deren Grundstücke über ein internes Straßennetz mit der Fernstraße 91 nach An Giang verbunden sind (Abbildung 3-4). Für die Stromversorgung sorgen ein 2.800 MW Kraftwerk und die nationale Stromlieferung mit separater Versorgung der Industriezone. Ein Dampfkraftwerk liefert zusätzliche Energie, damit die Industriebetriebe dauerhaft produzieren können. Das zentrale Trinkwasserkraftwerk ist für die Versorgung mit Produktionswasser verantwortlich, alle Industrieunternehmen sind an das offene Abwassersystem in der Industriezone Tra Noc angeschlossen (CEPIZA o. J., CES 2009). Nichtsdestotrotz wird der Fluss Hau als Hauptentsorgungsweg für das anfallende Ab-, Regen- und Hochwasser genutzt. Jedes Jahr transportiert er 200 Millionen Kubikmeter Wasser bis zur Mündung ins Südchinesische Meer und ist gleichzeitig die internationale Handelsverbindung der Industriezone nach Kambodscha (NGUYEN 2010b).

Aufgrund des industriellen Wachstums wurde im Jahr 2000 die Industriezone Tra Noc I um 165 ha erweitert. 49 Unternehmen haben sich seitdem in der Industriezone Tra Noc II niedergelassen (CES 2009).

Über 32.000 der Einwohner von Can Tho arbeiten in den ansässigen Industriezonen, mehr als 20.000 davon in der Industriezone Tra Noc (DTINEWS 26.11.2013), wobei ungefähr 10 % Saisonarbeiter sind (INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY VIETNAM 2012). In den

Industriebetrieben verdienen einfache Mitarbeiter pro Monat etwa 2.000.000 VND, was aktuell ungefähr 70 EUR (DTINEWS 22.01.2014) entspricht und liegen damit über dem durchschnittlichen Monatsgehalt der Region, das 2008 bei 940.000 VND lag. Auch wenn sich die Armutsgrenze in den letzten Jahren im Mekong Delta reduziert hat, geht GARSCHAGEN et al. (2012) davon aus, dass der dominierende landwirtschaftliche Sektor mit 51 % der Beschäftigten der Bevölkerung nur ein geringes Einkommen und einen schlechten Lebensunterhalt bieten kann. Nebenberuflich sind deshalb Landwirte und landwirtschaftliche Angestellte auch in anderen Bereichen tätig (GARSCHAGEN et al. 2012)



Foto: Wasielewski (2013)

Abbildung 3-4: Einfahrt zur Industriezone Tra Noc, Can Tho

Als Investor der Industriezone Tra Noc ist die Can Tho Industrial Zone Infrastructure Construction Company (CIPCO) eingetreten, die sowohl die Industriezone inklusive der notwendigen Infrastruktur (Straßen, Wasser- und Abwasserleitungen, Energieversorgung, etc.) gebaut hat, als auch offiziell als Verpächter der Grundstücke an die Industrieunternehmen auftritt.

Alle administrativen Aufgaben hinsichtlich der Verpachtung an die Industrieunternehmen, aber auch alle weiteren Verwaltungstätigkeiten, werden vom Industriezonenmanagement, der Can Tho Export Processing and Industrial Zones Authority (CEPIZA) übernommen. CEPIZA kümmert sich neben den Verwaltungsaufgaben um die Erhaltung der Gebäude und die Emissionsüberwachung innerhalb der Industriezone Tra Noc.

Die Industrieunternehmen in der Industriezone Tra Noc sind hauptsächlich landwirtschaftliche und Aquakultur verarbeitende Betriebe, die sich, wie bereits in Kapitel 2.3.4 erörtert, aufgrund der intensiven Landwirtschaft in der Region angesiedelt haben. Vorzufinden sind in der Industriezone Tra Noc folgende Industriezweige:

- Fischverarbeitung
- Metall und Stahlproduktion

- Lebensmittel- und Getränkeherstellung
- Bauindustrie
- Tierfutter
- Petrochemie
- Pharmazie, Pestizide, Düngemittelherstellung
- Textilverarbeitung
- Dienstleistungen

Technische Rahmenbedingungen

Die technischen Rahmenbedingungen der Fallbeispiele spiegeln das lokale Umfeld wieder, weshalb auf die Unterkapitel 3.3.1 - 3.3.4 verwiesen wird.

3.1.2 Akteursanalyse

Um die Handlungsmöglichkeiten und -grenzen der einzelnen Akteure bezüglich der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in der Industriezone Tra Noc zu untersuchen, wird zunächst ein Systembild zusammengestellt, das die funktionell miteinander verbundenen Akteure darstellt. In der Regel bestehen diese Verbindungen aus Stoff-, Energie-, Informations- und/oder Geldflüssen (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002).

Die Autoren FRISCHKNECHT & SCHMIED (2002) teilen die Beziehungen zwischen den Akteuren nach (1) Übereinstimmung, (2) Konkurrenz, (3) Widerspruch und (4) Indifferenz ein. Während die Beziehung von Fall (1) wünschenswert ist und der Fall (4) problemlos zu sehen ist, sind Akteure deren Zielbeziehungen dem Fall (2) oder (3) entsprechen hinsichtlich Handlungsoptionen und Restriktionen genauer zu untersuchen.

Um die genauen Ziele der beteiligten Akteure in der Industriezone Tra Noc herauszufinden, wurden Gespräche mit den beteiligten Interessensgruppen vor Ort durchgeführt und die Beziehungen in der Abbildung 3-5 dargestellt.

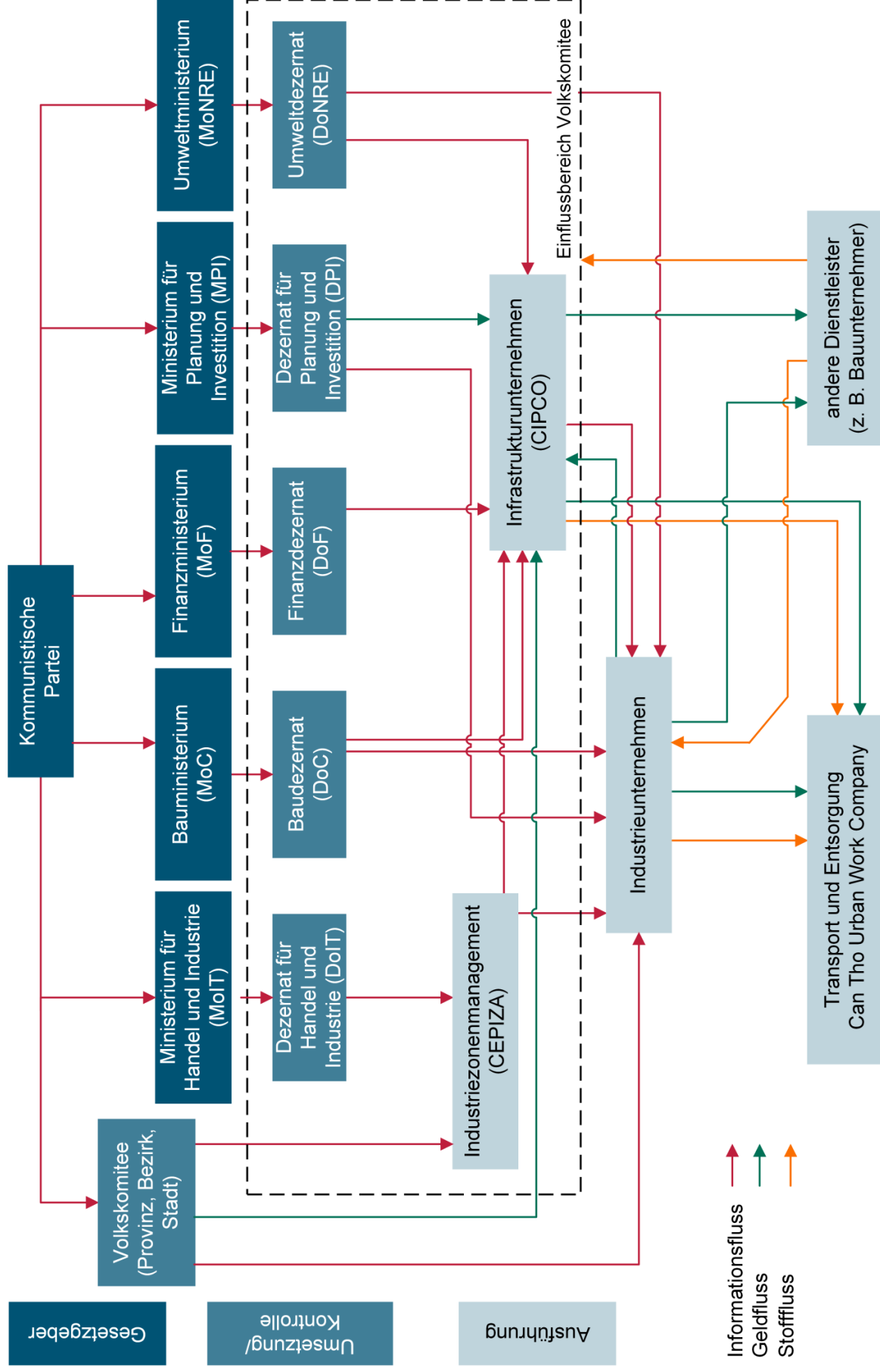


Abbildung 3-5: Systembild der funktionell miteinander verbundenen Akteure in der Industriezone Tra Noc

In dem Kapitel 2.3.8 wurden bereits die Schlüsselakteure, die in Vietnam innerhalb der Industriezonen an einem Klärschlammkonzept beteiligt sind, identifiziert und nach ihren Einflussmöglichkeiten bewertet. Für die Fallstudie Industriezone Tra Noc sind eine Übertragung der Identifikation der Schlüsselakteure und deren Einflussmöglichkeiten gegeben. Als die Akteure mit dem meisten Einfluss sind in dieser Fallstudie ebenfalls die nachfolgenden Interessensgruppen zu nennen:

- a) Volkskomitee
- b) Industriezonenmanagement
- c) Infrastrukturunternehmen der Industriezone
- d) Industrieunternehmen.

Einer der Schlüsselakteure sind die Industrieunternehmen, die in der Industriezone Tra Noc ansässig sind. Jedes Unternehmen mit einer Abwasserreinigungsanlage muss laut der gesetzlichen Regelungen Klärschlamm behandeln und entsorgen oder zumindest ein Entsorgungsunternehmen hierfür beauftragen. Da in Entwicklungsländern ein Kapitalmangel besteht und Unternehmen als Hauptziel, die Gewinnmaximierung verfolgen (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002), sind geringe Kosten zur Behandlung und Entsorgung des Klärschlammes für die Unternehmer der Industriebetriebe ausschlaggebend (siehe Kapitel 2.3.8). Der Einfluss der Industrieunternehmen steigt mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln sowie den politischen Beziehungen.

Für den Bau und den Betrieb des Zentralklärwerks ist der Industriezoneninvestor bzw. das Infrastrukturunternehmen der Industriezone Tra Noc CIPCO verantwortlich. CIPCO hat aufgrund der Stellung innerhalb der Industriezone Tra Noc einen großen Einfluss auf das Klärschlammkonzept und die daran beteiligten Akteure. Die Umsetzung einer der erarbeiteten Alternativen kann maßgeblich durch CIPCO behindert werden, indem beispielsweise eine dezentrale Klärschlammbehandlung durch Vorgaben des Infrastrukturunternehmens unterbunden wird. Zumindest die Industrieunternehmen mit einem geringen Einfluss werden damit zur zentralen Klärschlammbehandlung mit Gebührenzwang gezwungen. Es besteht somit zwischen den Industrieunternehmen, die in den Gesprächen zu einer dezentralen Lösung tendierten, und CIPCO eine Konkurrenz-Beziehung (2). CIPCO hat in allen drei Kernfunktionen (Legitimität, Ressourcen und Vernetzung) einen starken Einfluss, der jedoch durch den des Volkskomitees überboten wird, was zweckdienliche Entscheidungen erschwert.

Als dritter Schlüsselakteur ist in der Industriezone Tra Noc die durch die vietnamesische Regierung eingesetzte Verwaltungsstelle CEPIZA zu sehen. Durch das Management der Industriezone Tra Noc stehen der Institution viele Informationen über die Industrieunternehmen zur Verfügung, die Vernetzung mit den anderen Akteuren ist gegeben. Aufgrund der Ziele, Investorenfindung und Umsetzung der staatlichen Richtlinien hinsichtlich Emissionsschutz, wirken die Beziehungen von CEPIZA zu CIPCO und den Industrieunternehmen problemlos, allerdings kommt es durch den Einfluss der

kommunistischen Partei und der Problematik der Abwassergebühren, Finanzierung und Kosten immer wieder zu Spannungen zwischen den drei identifizierten Schlüsselakteuren (3). Hinsichtlich der Legitimation ist CEPIZA, als staatliche Einrichtung, oberhalb von CIPCO einzuordnen.

Der Staat wird auf der kommunalen Ebene durch die Volkskomitees vertreten, die - zumindest in der Theorie - für die Einhaltung der von den Ministerien aufgestellten Gesetze, Richtlinien und Normen verantwortlich sind. In der Praxis setzen die Volkskomitees jedoch vielmehr die Ziele der kommunistischen Partei um. Die Volkskomitees werden von der lokalen Bevölkerung gewählt und vertreten offiziell deren Wünsche und Meinungen, so auch in der Stadt Can Tho. Dem Volkskomitee untergeordnet ist das Umweltdezernat welches gegründet wurde, um das Volkskomitee von Can Tho bei der Umsetzung der staatlichen Vorgaben hinsichtlich Wasser, Bodenschätze, Land, Geologie, Umwelt, Hydrometeorologie und Kartographie zu unterstützen (NGUYEN 2010b). Außerhalb der Industriezone oder wenn Klärschlamm die Industriezone Tra Noc verlässt, ist DoNRE für die Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm verantwortlich. Innerhalb der Industriezone fällt dieser Part CIPCO zu.

Das Umweltdezernat ist für die Genehmigungen zur Einleitung von Abwässern in Kanäle und Vorflutern verantwortlich. Im Bereich Abwasser und Klärschlamm zählt die Überwachung und Qualitätskontrolle zu dem Aufgabenbereich des Dezernats. Bei der Umsetzung einer der ausgewählten Alternativen in der Industriezone Tra Noc ist nicht das Umweltdezernat für die Qualitätskontrolle verantwortlich, sondern auch hier das Infrastrukturunternehmen CIPCO (2).

Weitere wichtige Dezernate sind das Department of Finance (DoF), das für die Einführung der Abwassertarife in der Industriezone Tra Noc zuständig ist und das Department of Planning and Investment (DPI), das den Bau des Zentralkläwerkes mitfinanziert. Hinsichtlich der technischen Fragen für die Bauplanung ist das Department of Construction (DoC) ein großer Mitredner. Die Gesetzgeber und deren eingesetzte Kontrollbehörden verfolgen aber das gemeinsame Ziel die Umweltprogramme durchzusetzen, so dass innerhalb der staatlichen Einrichtungen eine Übereinstimmung in Bezug auf das Klärschlammkonzept herrscht (1).

Neben den staatlichen Gesetzgebern und deren Umsetzungsbehörden existieren Randgruppen, deren Einfluss auf die Konzeptentwicklung eher gering ist. Hierzu zählen die Angestellten der Industriebetriebe und des Zentralkläwerkes die für den Betrieb und die Wartung der Abwasserreinigungsanlage und die Umsetzung der Klärschlammbehandlung verantwortlich sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Angestellten keinen Einfluss auf die Auswahl einer Alternative haben. Allein die Verantwortung über einen reibungslosen Betriebsablauf nach der Umsetzung wird von den Angestellten erwartet. Nicht ganz außer Acht zu lassen, ist die Abhängigkeitsbeziehung zwischen den Angestellten und CIPCO bzw. den Industrieunternehmen, denn die Angestellten

sind in einem Abhängigkeitsverhältnis, da sie auf ihre Arbeitsplätze angewiesen sind (4).

An der Umsetzung der erarbeiteten Alternative sind verschiedene Auftragnehmer an der Klärschlammbehandlung und -entsorgung innerhalb der Industriezone Tra Noc beteiligt. Für den Bau und die Ausstattung sind Dienstleister, wie Bauunternehmen u. a., zu beauftragen. Für die Verwertung bzw. Entsorgung sind Verträge mit Landwirten, Unternehmen der Baustoffindustrie oder Deponiebetreiber abzuschließen. Da diese Beziehungen abhängig von der Alternative sind, ist die Beziehung im Schaubild gestrichelt dargestellt. Zudem haben die Dienstleister trotz einer Indifferenz (4) (Auftragsabschluss mit Gewinn vs. kostengünstige Entsorgung) so gut wie keinen Einfluss auf die Entscheidung über die Alternative.

Als letzte Randgruppe sind die Anwohner zu nehmen, die durch die Umweltverschmutzung von unbehandeltem Klärschlamm negativ beeinflusst werden und zudem Beeinträchtigungen, wie Geruch, Lärm und Verkehr, durch die Behandlung und Verwertung des Klärschlammes erfahren. CIPCO und die Industrieunternehmen hingegen zählen oftmals zu den Arbeitgebern der in den an die Industriezone Tra Noc angrenzenden Wohngebieten lebenden Menschen. Auch, wenn hier ein Widerspruch (3) in der Beziehung bestehen kann, ist der Einfluss der Anwohner gering und nicht ausschlaggebend.

Tabelle 3-1 stellt die wichtigsten Ergebnisse der Interviews in Bezug auf die Zielvorstellungen und daraus abgeleiteten Handlungsrestriktionen dar. Die je mit Konkurrenz (2) und Widerspruch (3) eingeordneten Beziehungen sind für den weiteren Verlauf der Konzepterstellung näher zu betrachten.

Tabelle 3-1: Zielvorstellungen der beteiligten Akteure sowie ihrer Beziehungen und Handlungsrestriktionen in der Industriezone Tra Noc

Akteure	Zielvorstellung	Handlungsrestriktionen
Volkskomitee	Bürgerfreundliche Lösung, kostengünstig; Einhaltung der umwelttechnischen Gesetze, Normen und Richtlinien	Vorgaben der kommunistischen Partei umsetzen; staatlichen Rahmenbedingungen
Industrieunternehmen	dezentrale Lösung; kostengünstig hinsichtlich Investition und Betrieb; zuverlässige Technologie (gegenüber Überschwemmungen); geringer Energiebedarf; einfache technische Ausrüstung	Vorgaben von CEPIZA und CIPCO; Kapitalvermögen des Unternehmens; staatliche Rahmenbedingungen
CIPCO	geringe Investitions- und Betriebskosten; geringer Platzbedarf; zentrale Lösung	Finanzierung des Zentralkläwerks

Akteure	Zielvorstellung	Handlungsrestriktionen
CEPIZA	Investorenfindung; Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen	staatlichen Rahmenbedingungen
DoNRE	Einhaltung der umwelttechnischen Gesetze, Normen und Richtlinien	staatlichen Rahmenbedingungen
Angestellte der Industrieunternehmen und des Zentralklärwerts	einfache technische Ausrüstung, geringe Wartung und Betriebsaufwand, ausreichende Einweisung in die Klärschlammbehandlung	Vorgaben des Arbeitgebers müssen eingehalten werden; kein Mitspracherecht bei der Auswahl der Technologie oder Entsorgung
Transport- und Entsorgungsunternehmen	Auftragserteilung bzw. bei der stofflichen/thermischen Verwertung Kooperationsverträge	finanzieller Auftragsrahmen; staatliche Rahmenbedingungen
Anwohner	geringe Beeinträchtigung durch die Schlammbehandlung und -entsorgung; Arbeitsplatzschaffung	Abhängigkeitsverhältnis aufgrund des Arbeitsplatzes; Umweltverschmutzung wird hingenommen
sonstige Dienstleistungsunternehmen	Auftragserteilung	finanzieller Auftragsrahmen; staatliche Rahmenbedingungen

Im Allgemeinen konnte bei den Befragungen der beteiligten Interessensgruppen festgestellt werden, dass bei allen Akteuren ein Bewusstsein für Umweltprobleme vorhanden ist. Wahrgenommen werden vor allem die Wasserverschmutzung durch ungeklärtes Abwasser sowie die durch die Industriezone Tra Noc entstehende Luftverschmutzung. Als Informationsquelle der Akteure für die Umweltverschmutzungen werden das Fernsehen, Internet und Zeitungen genannt. WIENEKE (2005) stellte bei seinen Umfragen in Vietnam fest, dass Zeitungen als Informationsquelle von Menschen genutzt werden, die ein höheres Bildungslevel vorweisen und ökonomisch besser gestellt sind. Die traditionellen Medien, wie Zeitungen und Fernsehsender, sind in Vietnam immer noch weitgehend in staatlichem Besitz, monopolisiert und durch den Staat kontrolliert. Neue Medien sind hinsichtlich der Informationsweitergabe zwar schwieriger zu kontrollieren, aber auch hier bestehen Restriktionen (MOL 2009). Der Informationsrückhalt basiert laut MOL (2009) darauf, dass gegen die politische Elite hinsichtlich der katastrophalen Umweltauswirkungen durch den einseitigen wirtschaftlichen Entwicklungsweg (schnelles Wirtschaftswachstum) keine Kritik aufkommt. Die Handlungsrestriktionen der einzelnen Akteure sind also ggf. durch einen Informationsmangel begründet.

Der Informationsmangel im Bereich Klärschlamm scheint nicht nur auf die Medien zurückzuführen zu sein. In den Gesprächen und Interviews zeigte sich eine Unwissenheit gegenüber der Entstehung, Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm bei den Be-

fragten, beispielsweise durch die Fehleinschätzung von Klärschlamm-mengen. Wie bereits in der allgemeinen Situationsanalyse dargelegt, herrscht in Vietnam momentan ein Fachkräftemangel, der anscheinend besonders im Bereich Klärschlamm durch Unwissenheit und Unerfahrenheit deutlich wird. NGUYEN (2010b) stellte ein fehlendes Fachwissen und Verwirrtheit ebenfalls bei den Behörden der Stadt Can Tho fest, die sich in den Befragungen und Gesprächen hinsichtlich Klärschlamm bestätigte. Dementsprechend sind die Handlungen der einzelnen Akteure auch unter diesem Aspekt zu betrachten. Auf längere Sicht gesehen sind Schulungen, Weiterbildungen und Workshops zur Wissensbildung auf dem Gebiet Klärschlamm in der Industriezone Tra Noc notwendig, um ein nachhaltiges Klärschlammkonzept umzusetzen.

3.2 Ableitung relevanter Zielkriterien für die Industriezone Tra Noc

Als zu erreichender Soll-Zustand ist in der Industriezone Tra Noc die Umsetzung einer zentralen oder/und dezentralen Klärschlammbehandlung mit anschließender Verwertung und Entsorgung zu sehen. Hierfür steht das nachhaltige Klärschlammkonzept mit den aufgestellten Kriterien, die durch die Situationsanalyse für die Fallstudie Industriezone Tra Noc verfeinert wurden.

Einige der für Vietnam allgemein aufgestellten Kriterien haben sich für die Fallstudie bestätigt, andere hingegen sind weggefallen. Das Kriterium „angepasste Technologie“ ist anhand der in Kapitel 2.6.4 ausgearbeiteten Definition bereits in verschiedenen Kriterien enthalten, wie beispielsweise der einfachen Handhabung, den kurzen Transportwegen, der Flexibilität, den einfachen Maschinen und der Prozessüberwachung etc., und entfällt somit.

In Tabelle 3-1 sind die Kriterien, die das Klärschlammbehandlungskonzept erfüllen soll, aufgestellt und den fünf Nachhaltigkeitskategorien Gesundheit und Hygiene, Umwelt und natürliche Ressourcen, Technologie und Betrieb, finanzielle und ökologische Kriterien sowie soziokulturelle und institutionelle Kriterien zugeteilt worden. Aufgrund der immer größer werdenden Genauigkeit ist eine Untergliederung der Zielkriterien in Indikatoren vorgenommen worden, die als Hilfsmittel für die quantitative Erfassung der Systemzustände genutzt werden.

Nachhaltiges Klärschlammkonzept für Industriezonen		
Nachhaltigkeitskriterien	Zielkriterien	Indikatoren
Gesundheit und Hygiene	geringe Beeinträchtigung durch Umweltverschmutzung	Rückbelastung
	Reduzierung des gesundheitlichen Risikos	Effektivität
Umwelt und natürliche Ressourcen	Beständigkeit gegenüber Standortfaktoren	Zuverlässigkeit
	Umsetzung der Umweltprogramme	
	Schonung natürlicher Ressourcen	Verwertung
	sichere Entsorgung und Verwertung	
	Schließung des Nährstoffkreislaufs	
Technologie und Betrieb	Flexibilität gegenüber Veränderungen	Flexibilität
	geringer Platzbedarf	
	einfache Handhabung	Betrieb
	angepasste Technologie	
Finanzielle und ökonomische Kriterien	geringe Kosten	Kosten
	Investorenfindung	
	geringe Investitionskosten	
	hohe Implementierungsrate	
	geringe Betriebs- und Wartungskosten	
	Vertragsabschluss	Ressourcen
	Kosteneinsparung	
Soziokulturelle und institutionelle Kriterien	geringe Verantwortung beim Personal	Bildungsstand
	Unabhängigkeit vom Bildungsniveau	
	Integration der zuständigen Behörden	Umsetzung
	Akzeptanz	
	Vorgabe der staatlichen Regularien	
	Umsetzung der staatlichen Regularien	

Abbildung 3-6: Zielkriterien und Indikatoren für die Industriezone Tra Noc

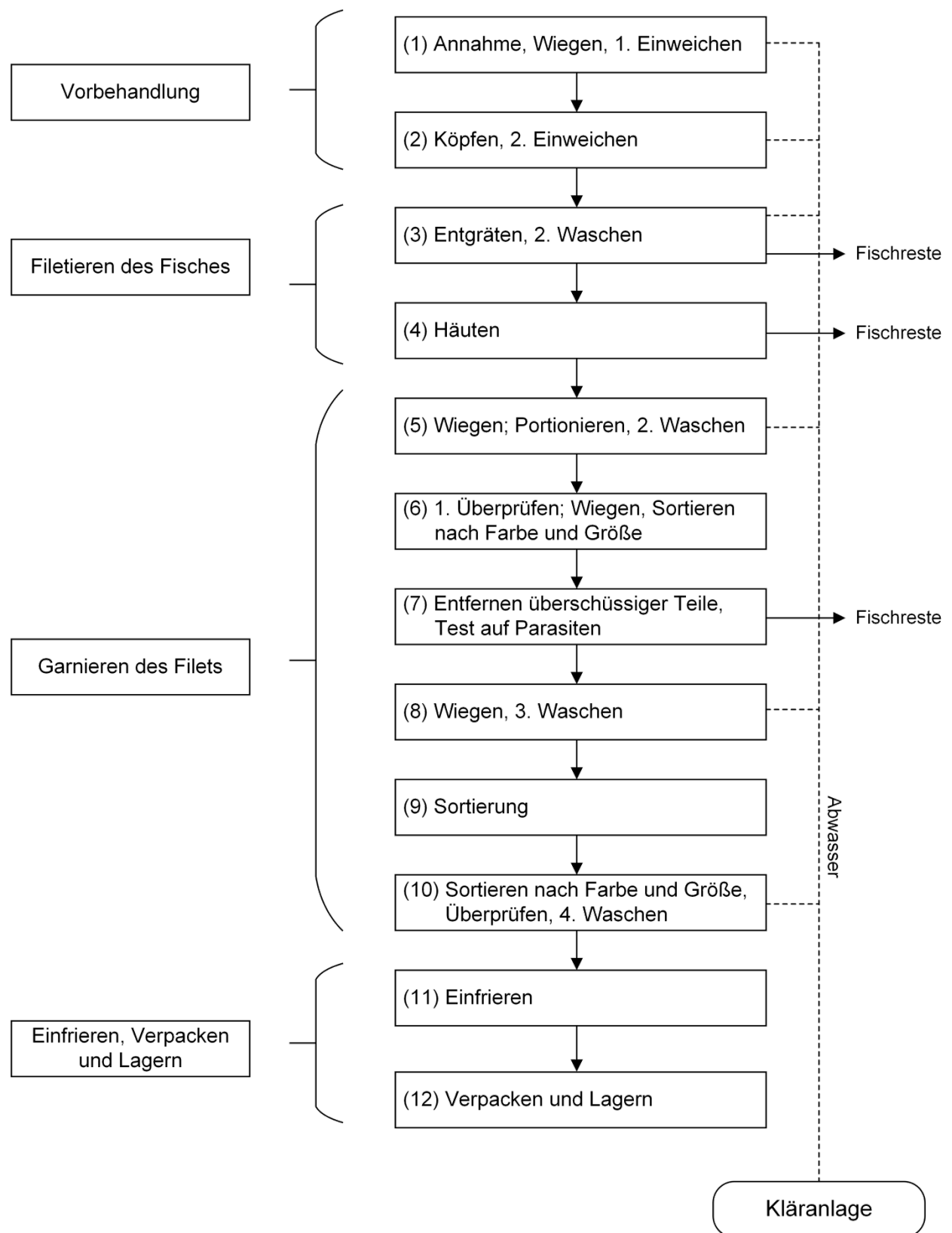
3.3 Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc

Die weitere Betrachtung bezieht sich vor allem auf die Industrieunternehmen mit einem Klärschlammanfall, da hier konkrete Lösungsmaßnahmen erarbeitet werden können. Es ist zwar möglich die im späteren Verlauf der Arbeit aufgestellten Lösungsmaßnahmen auf Industriebetriebe ohne Abwasserreinigungsanlage zu übertragen, doch ist hier ein größerer Maßnahmenkatalog notwendig, der mit dem in der Produktion anfallenden Abwasser beginnt.

Von den rund 170 Unternehmen in der Industriezone Tra Noc wurden als Fallbeispiele drei Industrieunternehmen ausgewählt, die bereits eine Abwasserreinigungsanlage betreiben und deren produzierter Klärschlamm für eine biologische Behandlung als geeignet eingestuft werden kann. Um möglichst verschiedene Industriezweige abzudecken, fiel die Wahl auf eine Chitosanproduktionsfirma, einen Fischverarbeitungsbetrieb und die Brauerei. Für diese Industrieunternehmen ebenso wie für das vierte Fallbeispiel, das Zentralklärwerk, werden die Möglichkeiten einer dezentralen und einer zentralen Klärschlammbehandlung untersucht (siehe Alternativen in Kapitel 2.7).

3.3.1 Fallbeispiel 1: Fischverarbeitung

Der Fischereisektor ist ein signifikanter und schnell wachsender Bereich der vietnamesischen Wirtschaft (ANH 2010). Das schnelle Wachstum des Sektors ermöglichte Vietnam einer der größten Fischexporteure der Welt zu werden (SEBESVARI et al. 2012), hat jedoch einige Umweltprobleme mit sich gebracht (ANH 2010). Das Mekong Delta produziert momentan über 70 % der landesweiten Pangasiusproduktion (ANH 2010), weshalb sich in der Industriezone Tra Noc die fischverarbeitende Industrie (19 Betriebe, 2013) sowie Betriebe zur Verarbeitung der Nebenprodukte (Fischmehlproduktion aus den Fischresten) angesiedelt haben. Ein typisches Prozessschema der Pangasiusverarbeitung zeigt Abbildung 3-7.



Quelle verändert nach ANH (2010)

Abbildung 3-7: Prozessschema der Pangasiusverarbeitung

Der untersuchte Fischverarbeitungsbetrieb ist 2005 auf einer Fläche von etwa 13.000 m² in der Industriezone Tra Noc II gegründet worden. Der Standort wurde aufgrund der Anbindung an den Land- sowie Flusstransport und der isolierten Lage zu den

Wohngebieten ausgewählt. Das Unternehmen produziert mit 700-800 Mitarbeitern 7 Tage die Woche in einem Zweischichtsystem rund um die Uhr. Zu einem Produktionsstopp kommt es laut Aussage der Direktion nur während des Tet-Fests (Neujahr nach dem Lunarkalender). Es werden jährlich 15.000 t Pangasiusfisch verarbeitet und nach Amerika, die EU, China, den mittleren Osten, Hong Kong, Russland, Afrika u.a. exportiert. Nach eigenen Aussagen entspricht die Produktion den Lebensmittel- und Hygienevorschriften, ebenso wie das Qualitätsmanagement- und Abwassersystem (nationale Standards). Dieses spiegelt sich in den Zertifikaten (ISO, HACCP, BRC, u. a.) des Unternehmens wieder.

Das notwendige Prozesswasser für die wasserintensive Fischverarbeitung bekommt das Unternehmen aus dem örtlichen Wasserwerk (1.500 m³/d) und den eigenen Trinkwasserbrunnen (60 m³/d) (CES 2009). Hiervon werden täglich etwa 450 m³ Abwasser in die firmeneigene Kläranlage eingeleitet, die aus einem Ausgleichsbecken, einer Flotation und mehreren Belebungsbecken mit anschließender Nachklärung besteht. Vor der Einleitung des gereinigten Abwassers in das Kanalsystem der Industriezone erfolgt eine Chlorierung zur Reduzierung der im gereinigten Abwasser enthaltenen Mikroorganismen. Der Klärschlamm wird regelmäßig aus dem Nachklärbecken abgezogen und in einem Schlamm-speicher gelagert. Je nach Schlammproduktion wird der Überschussschlamm in eins der Belebungsbecken zurückgeführt. Der tägliche Schlamm-anfall wird nach Aussagen der Direktion auf 300 m³ geschätzt. Eine Klärschlammbehandlung wird nicht durchgeführt. Die Abbildung 3-8 zeigt die Belebungs- sowie das Nachklärbecken der Kläranlage.



Fotos: Kreuter (2014)

Abbildung 3-8: Belebungs- und Nachklärbecken der Kläranlage des Fischverarbeitungsbetriebes

3.3.2 Fallbeispiel 2: Chitosanherstellung

Vietnam ist nicht nur ein bedeutender Exporteur für Pangasiusfisch, sondern dank der Zunahme der Aquakulturwirtschaft auch für Garnelen, deren Aufzucht hauptsächlich zum Erhalt des Garnelenfleisches durchgeführt wird (TRUNG & PHUONG 2012). Als Nebenprodukte bleiben ca. 35-45 % der Schalen und Köpfe über (TRUNG & PHUONG 2012). Die Garnelenreststoffe enthalten in tropischen Regionen 10-20 % Calcium, 30-65 % Protein und 8-10 % Chitin (VAN TOAN 2009) sowie Lipide, Caroinoide und Mineralien (TRUNG & PHUONG 2012). Chitosan, ein Polysaccharid, das durch die Deacetylierung von Chitin gewonnen wird (VAN TOAN 2009), ist besonders attraktiv, denn es wird im Lebensmittelbereich, der Landwirtschaft, der Kosmetikindustrie u. a. verwendet (TRUNG & PHUONG 2012). In der Industriezone Tra Noc werden die Garnelenreststoffe vom ansässigen Chitinhersteller weiterverarbeitet. Es existieren verschiedene Verfahren zur Gewinnung des hochwertigen Chitins durch das Entfernen von Protein, anorganischem Material (hauptsächlich CaCO_3), Pigmenten und Flüssigkeit (VAN TOAN 2009). Die Demineralisierung wird normalerweise durch eine Behandlung mit Salzsäure (HCl) erreicht, während die Deproteinisierung mit Natronlauge (NaOH) erfolgt (VAN TOAN 2009, TRUNG & PHUONG 2012). Durch die Deacetylierung wird aus dem gewonnenen Chitin Chitosan und Glucosamin, die in verschiedenen industriellen Bereichen eingesetzt werden (STRUSZCZYK 2000).

Der Produktionsprozess des in der Industriezone Tra Noc ansässigen Chitinherstellers, welcher einer der ersten in Vietnam war, die sich auf die Herstellung von Chitin und die sekundären Produkte spezialisiert hat, ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

Herstellung von D-Glucosamin

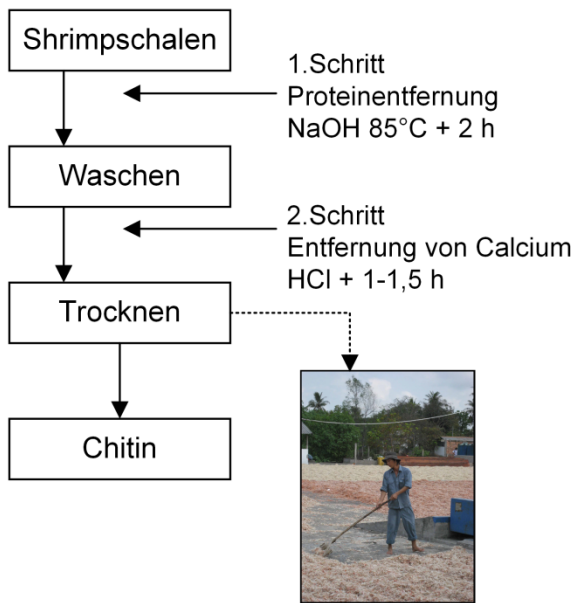
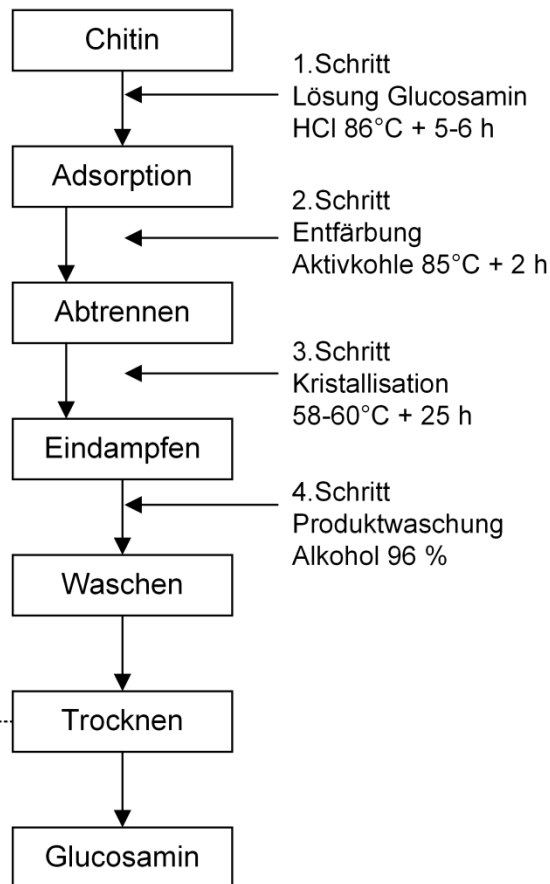
1. Produktionsprozess
Herstellung von Chitin2. Produktionsprozess
Herstellung von Glucosamin

Abbildung 3-9: Produktionsprozess von Glucosamin

Ein großer Standortvorteil für das Unternehmen ist die ganzjährig mögliche Aquakulturzucht im Mekong Delta. Das Unternehmen produziert deshalb das ganze Jahr in einem Zweischichtsystem sieben Tage die Woche 24 Stunden lang. Momentan werden für Inland und Export 2.000 Mt/a Chitin, 50 Mt/a Chitosan und 1.200 Mt/a Glucosamin mit 70-90 Mitarbeitern hergestellt und in die USA sowie nach Japan und die EU geliefert (SUNTZE LIFESCIENCE CO., LTD 2008).

Für die Produktion von Chitin und dessen Folgeprodukten wird jährlich eine Prozesswassermenge von etwa 24.000 m³ benötigt. Das Wasser stammt aus Grund-, Oberflächen- und Brauchwasserquellen. In die firmeneigene Kläranlage, die seit 2004 besteht, werden täglich ca. 230 m³ Abwasser eingeleitet und mit dem Belebungsverfahren gereinigt (siehe Abbildung 3-10). Für den anfallenden Überschussschlamm ist keine Klärschlammbehandlung vorgesehen. Nach der Abwasserreinigung erfolgt die Einleitung in das Kanalnetz der Industriezone Tra Noc.

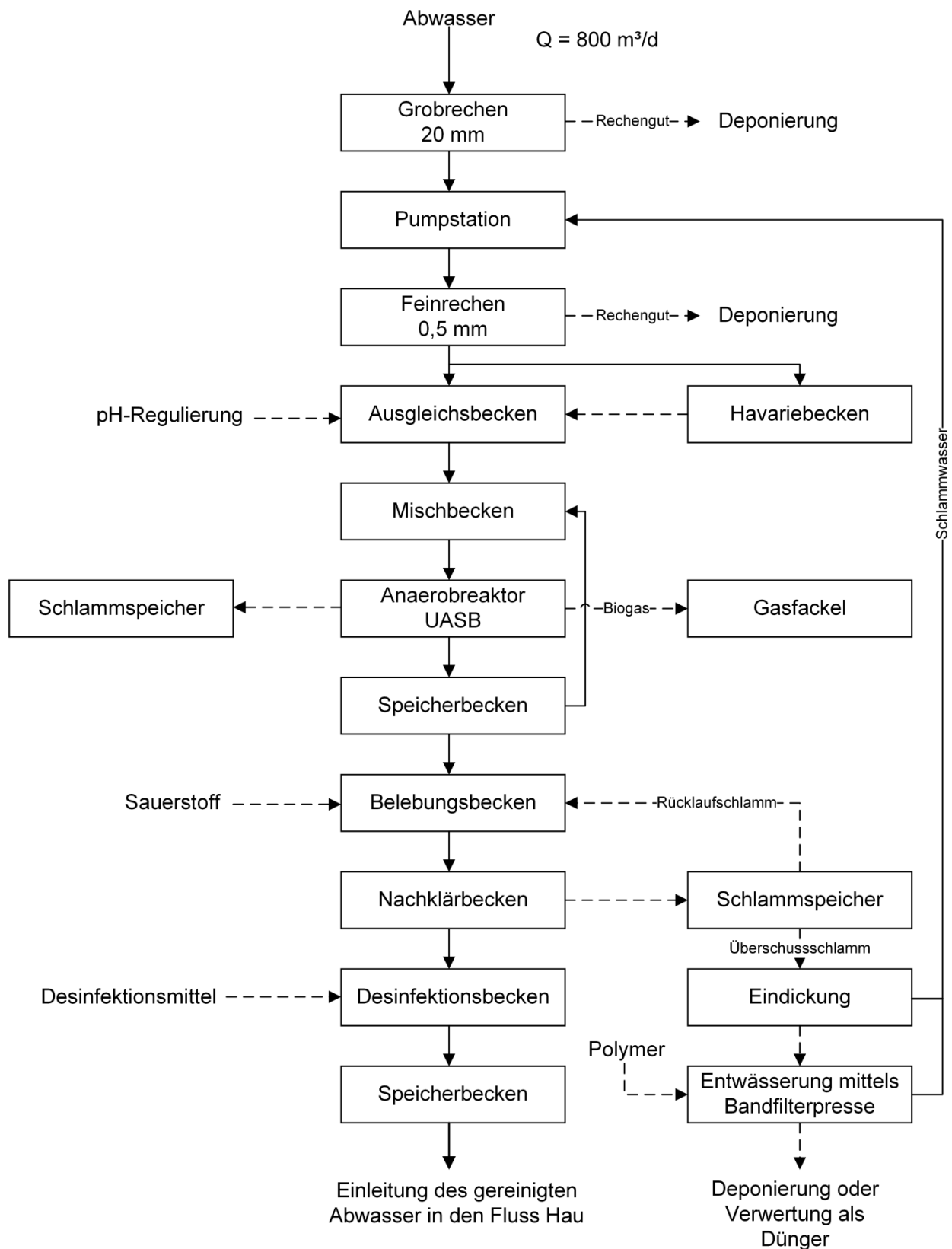


Abbildung 3-10: Belebungsbecken der Kläranlage und Probenahme beim Chitinhersteller

3.3.3 Fallbeispiel 3: Brauerei

Wie in vielen anderen Ländern auf der Welt zählt auch in Vietnam das Bier zu den beliebtesten alkoholischen Getränken und der Bierkonsum steigt jährlich. Im Jahr 2013 tranken die Vietnamesen über 30 Millionen Hektoliter Bier, umgerechnet auf die Einwohnerzahl trank jeder Vietnameser 32 L pro Jahr (VPBS 2014). Die einheimischen Brauereien dominieren den vietnamesischen Markt gegenüber Importprodukten aufgrund einer langen Etablierung und der weiten Verbreitung von einheimischen Bieren sowie den günstigeren Preisen. Marktführer ist die Saigon Beer Alcohol Beverage Joint Stock Corporation (SABECO) mit 47,5 % Marktanteil (VPBS 2014).

Eine Tochtergesellschaft des Unternehmens braut in der Industriezone Tra Noc Saigon die verschiedenen Biersorten, Saigon Export, 333'Export und Saigon Lager, des Unternehmens. Momentan sind 120 Mitarbeiter in der Brauerei beschäftigt, die seit dem Jahr 2000 mit deutscher Prozesstechnik jährlich rund 230.000 hl VB (Verkaufsbier) produzieren. Der Absatz des Verkaufsbiers wird von SABECO übernommen. Für den Brauprozess werden jährlich 160.000 m³ Produktionswasser benötigt, so dass täglich etwa 800 m³ in die betriebseigene Kläranlage eingeleitet werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Kläranlagenschema der Brauerei mit der vorhandenen Klärschlammbehandlung.



Quelle: WSB (2014)

Abbildung 3-11: Kläranlagenschema der Brauerei mit Schlammbehandlung

3.3.4 Fallbeispiel 4: Zentralklärwerk

Im Jahr 2009 wurde das Circular 08/2009/TT-BTNMT erlassen, welches jede Industriezone in Vietnam dazu verpflichtet, ein Zentralklärwerk zur Abwasserreinigung der Industrieabwässer zu betreiben. CIPCO als Infrastrukturunternehmen der Industriezone Tra Noc ist demnach verpflichtet ein Zentralklärwerk zu bauen und zu betreiben, weshalb im zweiten Quartal 2012 die Vergabe des Projektes anstand und seit April 2013 das Zentralklärwerk für die Abwässer der Industriezone gebaut wird. Nach dem ursprünglichen Zeitplan sollte bereits im August 2013 mit einem Probetrieb begonnen werden. Allerdings kam es zu Verzögerungen, so dass eine Inbetriebnahme erst nach dem Tet-Fest im März 2015 stattfinden konnte.

In der Abbildung 3-12 sind die Lage des Zentralklärwertes in der Industriezone Tra Noc und das vorläufige Prozessdiagramm der ersten Phase dargestellt.

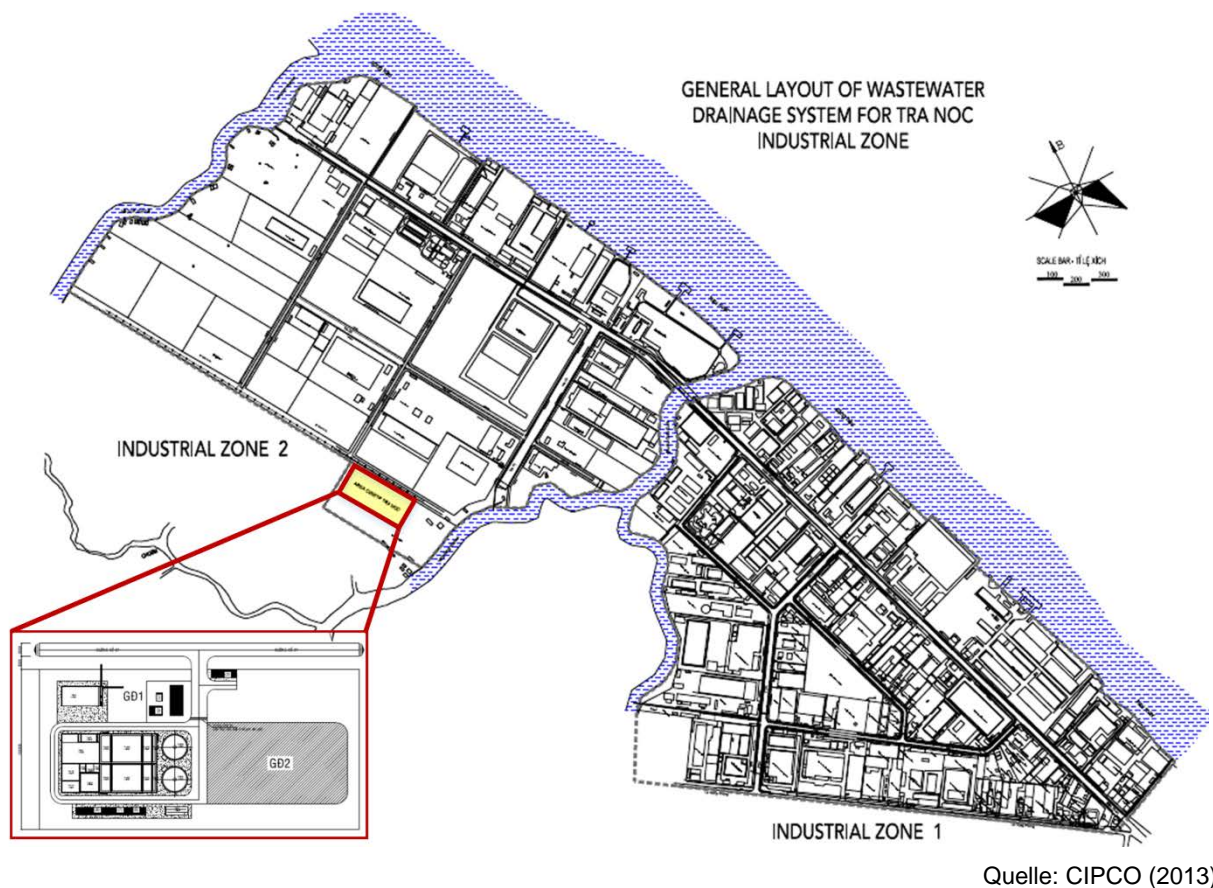


Abbildung 3-12: Lage und Prozessdiagramm (1. Phase) des geplanten Zentralklärwertes in der Industriezone Tra Noc

Aufgrund der verschiedenen Industriebranchen innerhalb des Einzugsgebietes ist davon auszugehen, dass der Zulauf des Zentralklärwertes ein weites Spektrum an Abwasserinhaltsstoffen aufweisen wird. Die Ungewissheit über die Zusammensetzung des Zulaufes und der finanzielle Aspekt haben den Betreiber des Zentralklärwertes in Tra Noc (CIPCO) bewogen, den Bau und die Inbetriebnahme in zwei Phasen einzuteilen. Im regulären Betrieb der ersten Phase werden zur Zeit täglich 6.000 m³,

etwa die Hälfte des in der Industriezone Tra Noc anfallenden Abwassers, behandelt, bis dann die vollständige Abwassermenge nach Abschluss des zweiten Bauabschnitts gereinigt werden kann. Der Bau des notwendigen Kanalnetzes für die Industriezone Tra Noc wurde im Zeitraum November 2013 bis Dezember 2014 durchgeführt. Das gesamte Bauvorhaben ist mit einem Kapitaleinsatz von 213.079.537.000 VND kalkuliert worden, das entspricht je nach Tageskurs etwa 8.850.000 EUR (Stand 03.2015).

Durch das im Zentralklärwerk zum Einsatz kommende Belebtschlammverfahren (siehe Abbildung 3-13) sowie den chemischen Behandlungsschritt zur Fällung und Flockung fällt täglich Überschuss- und Tertiärschlamm an. Eine vollständige Behandlung und Verwertung/Entsorgung des anfallenden Klärschlammes durch den Betreiber ist bis jetzt in keiner Phase geplant, auch wenn bei der hohen organischen Belastung und den vorherrschenden Temperaturen von einem schnellen Übergang des Schlammes zu stinkender Fäulnis auszugehen ist. Lediglich eine Entwässerung mit anschließender Lagerung der täglich anfallenden 300 m³ Überschuss- und Tertiärschlamm (Auslegungswert; berechnet) wurde berücksichtigt. Da beim Tertiärschlamm mit einer höheren Konzentration an Schwermetallen zu rechnen ist, wird dieser separat gelagert. Die anfallende Klärschlammmenge wird laut CIPCO täglich von einem beauftragten Entsorgungsunternehmen abgeholt. Für die Schlammbehandlung und -lagerung steht planerisch eine Fläche von 4 ha zur Verfügung. Eine Finanzierung für die Klärschlammbehandlung existiert momentan nicht.



Fotos: Kreuter (2015)

Abbildung 3-13: Belebungs- und Nachklärbecken des Zentralklärworks in der Industriezone Tra Noc

3.4 Überprüfung der Varianten für Behandlung, Verwertung und Entsorgung

In Kapitel 2.6.3 wurden die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen für Vietnam bereits eingegrenzt und sinnvolle Möglichkeiten für die Klärschlammbehandlung erarbeitet. Nichtsdestotrotz können sich für den Einzelfall andere Technologievarianten und Ver-

wertungswege als eine bessere und geeignetere Lösung für den anfallenden Industrie-klärschlamm herausstellen. Für die Fallstudie Industriezone Tra Noc und die vier ausgewählten Fallbeispiele der verschiedenen Industriezweige ist deshalb im Nachfolgenden zu überprüfen, welche Technologievarianten sowie Verwertungs- und Entsorgungswege aufgrund der Klärschlammqualität und -quantität sowie den Rahmenbedingungen umsetzbar sind.

3.4.1 Ermittlung der Klärschlamm-mengen für die Fallbeispiele

Wie bereits erwähnt, ist die Ermittlung der Klärschlamm-menge einerseits notwendig, um eine passende Behandlungstechnologie auszuwählen, andererseits um im späteren Verlauf die Dimensionierung und Auslegung der Klärschlamm-behandlungskomponenten vorzunehmen. Ein großes Problem in Entwicklungsländern stellt der mangelhafte Betrieb der Abwasserbehandlungsanlagen und die Verdünnungseffekte durch den extrem hohen Pro-Kopf-Wasserverbrauch bzw. Produktionswasserverbrauch dar, die zu einer geringen Schlammproduktion führen (ELBERG JØRGENSEN & HOLM KRISTENSEN 2005, ORTH et al. 2010, RUDOLPH et al. 2013). Zur Abschätzung der Schlammproduktion sollen deshalb laut ORTH et al. (2010) Bemessungsempfehlungen gewählt werden, die von dem abgebauten Substrat (CSB oder BSB) ausgehen, wie beispielsweise das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 (DWA 2000).

Als Faustregel zur Ermittlung der Klärschlammproduktion empfiehlt die WEF (2012) das Verhältnis zwischen der Trockensubstanzfracht und dem entfernten BSB₅ (siehe Tabelle 2-4) sowie eine Aufstellung der Massenbilanz für eine spezifischere Abschätzung der Klärschlammproduktion. In den ausgewählten Fallbeispielbetrieben konnten keine genauen Angaben über die anfallenden Klärschlamm-mengen von den Betreibern in Erfahrung gebracht werden. Es wurden im Gegenteil eher falsche Aussagen getroffen (siehe Kapitel 3.1.2). Aus diesem Grund ist für die Massenbilanz ein sechswöchiges Abwassermonitoring des Fischverarbeitungsbetriebes und der Brauerei durchgeführt worden. Für den Chitosanherstellungsbetrieb lagen lediglich Abwasserzulaufkonzentrationen vor, weshalb für die Klärschlamm-menge anhand der CSB-Bilanz eine Reinigungsleistung von 98 % angesetzt wurde. Als gasförmiger CO₂-Austrag aus dem Bilanzraum wurde von 30 % der zulaufenden CSB-Fracht ausgegangen und über die mg CSB/kg TS der täglich anfallenden Schlamm-menge bestimmt.

Für die Ermittlung der Schlammproduktion anhand der ATV-DVWK-A 131 sind die von ORTH et al. (2010) und WAGNER & GÜNKEL (2010) empfohlenen Bemessungsschlammalter und Stoßfaktoren für Abwassertemperaturen von 30°C in tropischen Klimaten herangezogen worden. Die Tabelle 3-2 stellt die errechneten Klärschlamm-mengen anhand der verschiedenen Bemessungs- und Massenansätze gegenüber. Für die Bestimmung der im Zentralkläwerk anfallenden Klärschlamm-menge über die CSB-Bilanz stand kein ausreichendes Datenmaterial zur Verfügung.

Tabelle 3-2: Ermittlung der Klärschlamm-mengen anhand verschiedener Bemessungs- und Massenansätze für die ausgewählten Fallbeispiele der Industriezone Tra Noc

Fallbeispiel	ATV-DVWK-A 131	Water Environment Federation	CSB-Bilanz
	[kg TS/d]	[kg TS/d]	[kg TS/d]
Fischverarbeitung	769	930	600
Chitosanherstellung	3.535	3.776	2.295
Brauerei	1.200	1.251	1.654
Zentralkläwerk	4.344	4.590	-/-

Der mangelhafte Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen ist weit verbreitet in Entwicklungsländern und konnte auch in der Industriezone Tra Noc mehrfach beobachtet werden. Die errechneten Klärschlamm-mengen können deshalb stark von den realen Klärschlamm-mengen der Fallbeispiele abweichen. Zumal die errechnete Klärschlamm-menge des Zentralkläwerks im Vergleich zu der Klärschlammproduktion der Chitosanherstellung zu gering erscheint. Die direkten Einflussgrößen auf die Schlammproduktion sind die Menge des abgebauten Substrates, das Schlammalter und die im Zulauf enthaltenen Feststoffe (ORTH et al. 2010), die bei einer hohen Zulaufmenge erheblichen Verdünnungseffekten (siehe Zentralkläwerk) unterliegen und sich dementsprechend in der Berechnung auswirken.

Zudem kommt es immer wieder zu Produktionsschwankungen, die mit dem durchgeführten sechswöchigen Abwassermonitoring nicht erfasst werden konnten. Um für das weitere Vorgehen trotzdem eine Größenordnung für die anfallenden Klärschlamm-mengen annehmen zu können, werden die mit der ATV-DVWK-A 131 und ORTH et al. (2010) errechneten Klärschlamm-mengen genutzt. Sowohl die Faustregel als auch die Bestimmung der Klärschlamm-menge über die CSB-Bilanz zeigen keine signifikante Abweichung von den anhand der ATV-DVWK-A 131 errechneten Klärschlamm-mengen. Als Bemessungsansatz kann das nach ORTH et al. (2010) modifizierte ATV-DVWK-A 131 je nach Datengrundlage empfohlen werden.

3.4.2 Charakterisierung der Klärschlämme in der Industriezone Tra Noc

Als zweiter Schritt nach der Situationsanalyse ist die Charakterisierung der Klärschlämme ein wichtiger Aspekt, der zum Ausschluss bestimmter Verwertungs- und Entsorgungsoptionen führen kann. Da die Industrieunternehmen selber keine Qualitätskontrollen durchführen, wurde über einen Zeitraum von zwei Jahren in der Industriezone Tra Noc die Klärschlammqualität der ausgewählten Fallbeispiele ermittelt.

Industrieabwasser ist durch starke Variationen im Durchfluss und der Schadstoffkonzentration gekennzeichnet (ELBERG JØRGENSEN & HOLM KRISTENSEN 2005), die sich auch im Industrieklärschlamm widerspiegelt. In Vietnam insgesamt, wie auch in der Fallstudie, wurde hinsichtlich der Betriebsführung der biologischen Reinigung festgestellt, dass in Zeiträumen mit geringer Produktion kein Überschussschlamm aus dem System abgezogen wird. Wechselnde Schlammalter resultieren in Schwankungen der Qualität und des Stabilisierungsgrades. Einzelne Stichproben können deshalb zu einer Fehlinterpretation führen und sind nicht zu empfehlen. Weitere Informationen zur Probenanalytik sind in Kapitel 4.3 beschreiben.

Tabelle 3-3 zeigt die wichtigsten Klärschlammparameter des Langzeitmonitorings der Fallbeispiele in der Industriezone Tra Noc. Für das Fallbeispiel Zentralklärwerk liegen aufgrund der verspäteten Inbetriebnahme keine Abwasser- und Klärschlammparameter vor, so dass die weitere Betrachtung auf der Datengrundlage erfolgt, die vom Betreiber CIPCO zur Auslegung und Bemessung des Klärwerkes genutzt wurde. Im Untersuchungszeitraum war es aufgrund der Krise in der Fischindustrie, den notwendigen Zugangsberechtigungen, den Produktionsprozessen und dem Kläranlagenbetrieb nicht realisierbar, durchgängig den anfallenden Klärschlamm ein und derselben Fischverarbeitung zu untersuchen. Da aber die Qualität und Quantität der Industrieklärschlämme auch innerhalb einer Industriebranche stark variieren kann, ermöglichte der notwendige Unternehmenswechsel einen vielfältigeren Überblick über die in der Industriezone Tra Noc und auch landesweit stark vertretene und wirtschaftlich für Vietnam wichtige Fischverarbeitungsindustrie.

Tabelle 3-3: Charakterisierung der Klärschlämme aus den ausgewählten Fallbeispielen der Industriezone Tra Noc im Vergleich zu landwirtschaftlich verwertetem Klärschlamm in Deutschland

Parameter	Einheit	Fischverarbeitung 1	Fischverarbeitung 2	Fischverarbeitung 3	Mittelwerte Fischindustrie	Chitosanhersteller	Brauerei	landwirtschaftl. verwerteter Klärschlamm (Deutschland) ²
TR	[%]	0,85	0,50	0,72	0,66	1,08	1,03	20
oTR	[%]	40	72	60	60	59	47	54
pH-Wert	[-]	6,2	7,0	7,5	7,1	7,2	7,9	8,4
CSB	[mg/L]	3.635	7.374	8.866	7.269	11.210	8.033	
TN	[mg/L]	330	438	466	421	432	332	

Parameter	Einheit	Fischverarbeitung 1	Fischverarbeitung 2	Fischverarbeitung 3	Mittelwerte Fischindustrie	Chitosanhersteller	Brauerei	landwirtschaftl. verwerteter Klärschlamm (Deutschland) ²
NH ₄ -N	[mg/L]	3,27	69,56	11,21	43	24,97	6,47	
TP	[mg/L]	448	216	307	286	245	273	
Ca	[g/kg]	68	16	66	42	102	33	
K	[g/kg]	21	6	3	5	18	6	4
Mg	[g/kg]	38	5	14	11	19	12	10
Cd	[mg/kg]	-	7	6	6	14	0,48	1
Cr	[mg/kg]	26	36	22	41	57	258	33
Cu	[mg/kg]	560	51	31	68	926	922	305
Ni	[mg/kg]	75	14	8	14	61	87	25
Pb	[mg/kg]	819	8	4	49	326	48	37,5
Zn	[mg/kg]	660	498	431	475	1.119	1.078	774
ΔH_u^1	[MJ/kg]	10,5	17,6	15,0	16,2	14,6	11,9	13,6
Coliform	[KBE/g TR]	-	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	-

¹berechnet nach Gale ²Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT (2010)

Als mögliche Verwertungs- und Entsorgungswege für Vietnam wurden in Kapitel 2.6.4 bereits die landwirtschaftliche Verwertung, die Mitverbrennung und als Übergangslösung die Deponierung erarbeitet. Werden nun die Klärschlammparameter der Fallbeispiele mit den notwendigen Behandlungsschritten und Voraussetzungen in Tabelle 2-12 verglichen, wird deutlich, dass keiner der anfallenden Klärschlämme als gefährlicher Abfall entsorgt werden muss, und somit eine Entwässerung für alle drei Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten sinnvoll oder sogar erforderlich ist.

Für die landwirtschaftliche Verwertung ist zwar eine Ausbringung mit einem geringen TR möglich, dieser verursacht jedoch erhebliche Transportkosten und deshalb ist dies nicht zu empfehlen. Da in den vietnamesischen Verordnungen nach derzeitigen Stand keine Schadstoffgrenzwerte für die landwirtschaftliche Verwertung festgelegt sind, wird als erste Richtlinie die deutsche ABFKLÄRV (2012) herangezogen. Im Vergleich der Schwermetallgehalte der ABFKLÄRV (Tabelle 2-12) mit den gemessenen Gehalten der in

den Fallbeispielen anfallenden Klärschlämme (Tabelle 3-3) ist die landwirtschaftliche Verwertung ohne Behandlung nicht möglich. Insbesondere die Konzentrationen an Blei und Cadmium erlauben keine direkte Verwertung. Im Hinblick auf die pathogenen Mikroorganismen ist die Anzahl an coliformen Bakterien ebenfalls zu hoch. Laut WEF (2012) ist eine infektiöse Dosis bei einer Konzentration von 10^4 coliformen Bakterien erreicht. PHILIPP (1988) stuft behandelte Klärschlämme als seuchenhygienisch unbedenklich ein, wenn nicht mehr als 10^3 Enterobacteriaceen pro g bzw. mg enthalten sind. Die in der Industriezone Tra Noc untersuchten Klärschlämme beinhalten 10^5 coliforme Bakterien, so dass bei der Auswahl der Behandlungsschritte auf eine Klärschlammstabilisierung und ggf. -desinfektion aus seuchenhygienischer Sicht in keinem Fall verzichtet werden sollte.

Für die Mitverbrennung ist insbesondere der untere Heizwert von Bedeutung, dieser sollte zwischen 9–12 MJ/kg oTR liegen. Die untersuchten Klärschlämme erfüllen diese Voraussetzungen, so dass die thermische Verwertung bei einer geeigneten Mitverbrennungsoption in der Industriezone Tra Noc durchgeführt werden kann. Dies gilt auch für den Entsorgungsweg der Deponierung.

Für den Klärschlamm des Zentralklärwerkes kann keine genaue Aussage über die Klärschlammqualität getroffen werden, da zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine fundierte Datengrundlage vorlag. Als Annäherung werden die Daten aus Tabelle 2-8 herangezogen. Demnach ist im Abwasser, das dem Zentralklärwerk zufließt mit einem hohen Gehalt an absetzbaren und gelösten Stoffen, Säuren und Alkalien sowie Öle und Fette im Zulauf zu rechnen.

Die Schwermetallkonzentrationen sind aufgrund der Datenlage schwer abzuschätzen. Bestehen die Einleiter hauptsächlich aus Betrieben der Lebensmittelindustrie sind die Schwermetallkonzentration vernachlässigbar, leiten aber beispielsweise Galvanisierungsbetriebe ihr Abwasser ins Zentralklärwerk ein, besteht die Gefahr, dass ein Großteil der im Abwasser enthaltenen Schwermetalle im Klärschlamm enthalten sind. OLIVEIRA et al. (2007) haben bei ihren Untersuchungen für die betrachteten Schwermetalle im Belebtschlammverfahren folgende Reinigungsleistungen festgestellt: Hg 61,5 %, Cd 60,0 %, Zn 44,9 %, Cu 44,2 %, Pb 39,7 %, Cr 16,5 % und Mn 10,4 %. Da bei der Entfernung von Schwermetallen aus der flüssigen Phase – unabhängig davon, ob diese durch Belebtschlammverfahren oder chemisch-physikalische Prozesse erfolgt – eine Schwermetallaufkonzentration im Klärschlamm stattfindet, kann zur Abschätzung der Schwermetallkonzentration im Klärschlamm eine einfache Massenbilanz herangezogen werden (SPERLING et al. 2005b).

Demzufolge wäre bereits bei einer Cadmiumkonzentration von 0,2 mg/L im Zulauf, bei der angenommenen täglichen Zulaufmenge zum Zentralklärwerk von 12.000 m³ und einer Klärschlammmenge von 4.344 kg TS/d (siehe Kapitel 3.4.1) mit einer Cadmiumkonzentration im Klärschlamm von 331 mg/kg TS zu rechnen.

Vom Zentralklärbetriebsbetreiber CIPCO wird angegeben, dass im Zulauf mit Konzentrationen zu rechnen ist, die sich im Bereich kommunalen Abwassers bewegen. Die eher geringen Zulaufkonzentrationen in Entwicklungsländern werden auch von anderen Autoren, wie ELBERG JØRGENSEN & HOLM KRISTENSEN (2005) und ORTH et al. (2010), bestätigt, so dass im weiteren Vorgehen von einer unkritischen Konzentration an Schwermetallen im anfallenden Klärschlamm des Zentralklärbetriebs ausgegangen wird.

3.4.3 Anpassung der Entsorgungs- und Verwertungsoptionen

Durch die Klärschlammmengen und die Charakterisierung der anfallenden Klärschlämme der Fallbeispiele konnten keine Einschränkungen der in Kapitel 2.6.3 erarbeiteten Verwertungs- und Entsorgungsoptionen festgestellt werden. Nachfolgend werden die bestehenden Möglichkeiten im Umfeld der Industriezone Tra Noc hinsichtlich der landwirtschaftlichen Verwertung, der Mitverbrennung und der Deponierung untersucht.

Landwirtschaftliche Verwertung

Die wesentlichen Einschränkungen für eine landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm sind die Bodenkontamination mit Schwermetallen und pathogenen Mikroorganismen sowie die Grund- und Oberflächenwasserkontamination durch Phosphor und Stickstoff. Die Schwermetallverfügbarkeit und -toxizität ist von vielen lokalen Faktoren abhängig, wie der geogenbedingten Schwermetallkonzentration, der Bodenstruktur, den Humuseigenschaften, dem Tongehalt, der Niederschlagsintensität, dem pH-Wert und der Kationenaustauschkapazität. Die Ausbringungsflächen für den behandelten Klärschlamm sollten unter Berücksichtigung der Umweltbelange sowie abhängig von der Bodeneignung und den Düngemittelsbeschränkungen hinsichtlich der angebauten Kulturpflanzen ausgewählt werden (SPERLING et al. 2005b).

In der Region Can Tho sind hauptsächlich alluviale Böden (Auenböden) zu finden, die nach FAO-Klassifizierung als Fluvisole oder Gleysole bezeichnet werden. Weltweit entstehen Fluvisole im Tide- und Überschwemmungsbereich der Küsten- und Uferstreifen von Meeren, Flüssen und Seen, wo Sedimente dominieren. Sie sind geprägt durch starke Grundwasserschwankungen sowie Überflutungen (ZECH & SCHAD 2014, SCHEFFER et al. 2002). Diese Böden zählen im Mekong Delta zu den fruchtbarsten und werden zum Anbau von Nassreis, Getreide und Obstplantagen benutzt, wodurch die Fluvisole und Gleysole allmählich in Anthrosole übergehen (ARNOLD 2010, ZECH & SCHAD 2014, GUONG & HOA 2012). Die Fluvisole zeichnen sich durch eine plattige bis geschichtete Struktur aus, die Wasserleitfähigkeit variiert, die geringe Aggregation beeinträchtigt die Tragfähigkeit für schwere Maschinen und oftmals kommt es zu Problemen wegen Überflutung und Trockenfallen (ZECH & SCHAD 2014). In länger genutzten Fluvisolen geht die Verfügbarkeit von Calcium, Magnesium und Phosphat zurück (KHOI & VAN TRI 2003), zudem können stark saure Horizonte entstehen mit hohen Gehalten an freien Aluminium- und Eisenionen (ARNOLD 2010, ZECH & SCHAD 2014). Die Zusammen-

setzung der Bodenarten ist laut BECKER et al. (2008) 57 % Ton, 34 % Lehm und 9 % Sand, der pH-Wert liegt zwischen 4,9-5,1.

Anthrosole hingegen weisen ein hohes Porenvolumen und hohe Luftkapazität sowie gute Wasserleitfähigkeit auf. Das Bodengefüge ist relativ stabil, während die Nährstoffverfügbarkeit mit gut bis sehr gut eingestuft wird und günstige pH-Werte zwischen 5-7 vorliegen (ZECH & SCHAD 2014).

Laut EPA (1983) sind geeignete Bodeneigenschaften zur Bewertung der Eignung von landwirtschaftlichen Flächen zur Ausbringung von Klärschlamm: Bodentiefe, Versickerungsrate und Filtrationskapazität, feine Struktur mit ausreichend bis hohem Wasser- und Nährstoffrückhaltevermögen, gute Drainageeigenschaften und Belüftung sowie einem pH-Wert im alkalischen bis neutralen Bereich (Reduzierung der Schwermetallmobilität und -löslichkeit). Aufbauend auf diesen Bodeneigenschaften ist in SPERLING et al. (2005b) ein Bodenbewertungssystem mit den folgenden Klassen aufgestellt worden:

- Bodenklasse I: besonders hohes Potenzial
- Bodenklasse II: hohes Potenzial
- Bodenklasse III: moderates Potenzial, strikte Einhaltung des Bodenschutzes wird empfohlen
- Bodenklasse IV: anfällig in der Anwendung; ausgleichende Kriterien wie Handhabung und Kultivierungsmethoden sollten bedacht werden. Risiken bestehen, wenn die Verfahren nicht strikt eingehalten werden.
- Bodenklasse V: aufgrund von inakzeptablen Umweltrisiken sollten diese Böden unter keinen Umständen genutzt werden.

Die Gesamteinstufung erfolgt anhand der restriktivsten Bodenklasse.

Die Tabelle 3-4 gibt die Bestimmung der Bodenklasse für die in der Provinz Can Tho vorherrschenden Fluvisole wieder.

Tabelle 3-4: Bestimmung der Bodenklasse für die in der Provinz Can Tho vorherrschenden Fluvisole

Kriterium	Bemerkungen	Bewertung	Bodenklasse
Bodentiefe	Die Profildifferenzierung ist i. d. R. schwach; es dominieren A- und C-Horizonte	2 - moderate	III
Bodenart	schwach schluffiger Ton (35 bis 60 % Ton)	0 - null	I
Erosionsanfälligkeit	flaches Flussdelta mit Überschwemmungsgefahr	1 - leicht	II
Wasserleitfähigkeit	unterschiedlich, je nach Textur	2 - stark	III

Kriterium	Bemerkungen	Bewertung	Bodenklasse
Topographie	Böden mit flachen Neigung (0-3 %)	0 - null	I
steiniger Boden	Boden ohne Steinschicht	0 - null	I
Hydromorphe Eigenschaften	Flussbegleitendes Grundwasser, das wegen starker Schwankungen, nur kurzer Stillstandsphasen und hoher Fließgeschwindigkeit relativ sauerstoffreich ist; wenig Hinweise auf hydromorphe Eigenschaften	2 - moderate	III
pH-Wert	Boden mit pH-Werten niedriger als 6,5 für gekalkte Klärschlammausbringung	0 - null	I
Gesamteinstufung der Bodenklasse		III	

Die Fluvisole erreichen in der Gesamteinstufung die Bodenklasse III. Daraus ergibt sich eine strikte Einhaltung des Bodenschutzes für die landwirtschaftlichen Flächen um die Industriezone Tra Noc.

In der Provinz Can Tho sind 80,6 % der Landnutzung landwirtschaftlich, davon 236.000 ha Nassreisfelder (GSO 2013), hinzu kommen Flächen für Getreide, Obstplantagen und Aquakultur (ARNOLD 2010) (siehe Abbildung 3-14). Für den Einsatz von Klärschlamm eignen sich die Nassreisfelder nur bedingt. Der Schlüsselfaktor sind die Landwirte und dessen Bewusstsein für eine ausgeglichene Düngung und Fruchtfolge (ARNOLD 2010). Für die Düngung von Nassreisfeldern wird eine Nährstoffmenge von 120,2 kg N/ha, 63,3 kg P/ha und 50,3 kg K/ha empfohlen, welches einem Nährstoffverhältnis von 100:50:40 entspricht (HA et al. 2005). In der Provinz Can Tho werden demnach 28.367 t N, 14.939 t P und 11.871 t K für den Reisanbau benötigt. Bei einer kompletten stofflichen Verwertung der in der Industriezone Tra Noc anfallenden Klärschlämme kann folglich nur eine geringe Menge des notwendigen Düngers ersetzt werden.

Bei einer Umsetzung der empfohlenen Fruchtfolgenrotation für den Reisanbau ist der Klärschlamm aus der Industriezone Tra Noc als Dünger in der Landwirtschaft geeignet. Ebenfalls für eine Klärschlammdüngung geeignet sind die Obstplantagen, die etwa 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in der Provinz Can Tho einnehmen (ARNOLD 2010).

Thermische Verwertung

Bei der energetischen Nutzung des Klärschlamms darf die Zusammensetzung weder das Endprodukt noch die entstehenden Verbrennungsabgase negativ beeinflussen, Voraussetzung für die Verbrennung ist in jedem Fall die Reduzierung des Wassergehaltes

durch die Trocknung des Klärschlammes (FÖRSTNER 2012). Bei der Betrachtung geeigneter Entsorgungswege für Vietnam in Kapitel 2.6.3 stellte sich die Monoverbrennung von Klärschlamm als ungeeignet heraus. Die Mitverbrennung in Müllverbrennungsöfen, der Zement- und Bauindustrie sowie in Kraftwerken ist jedoch für die Industriezone Tra Noc näher zu untersuchen.

Für die Verwendung in der Zementindustrie, die auch in der Industriezone Tra Noc vertreten ist, sind hohe Chlorid- und Quecksilbergehalte im Klärschlamm ungünstig, denn Chlorid ist im Zementklinker unerwünscht und Quecksilber entweicht mit den Rauchgasen, wenn keine entsprechende Rauchgasreinigung vorgesehen ist (FÖRSTNER 2012). Vorteilhaft sind die hohen Prozesstemperaturen der Hauptfeuerung durch die eine vollständige Zerstörung der organischen Komponenten bewirkt wird, die höher siedenden Schwermetalle werden in den Zementklinker eingebunden (KRAUS & HAHN 2004a, KRAUS & HAHN 2004b). Ein Nachteil besteht laut KRAUS & HAHN (2004b) in dem Energiebedarf für die Herstellung der Zementklinker, der einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt. Hinzu kommen die hohen Trocknungskosten für den Klärschlamm sowie mögliche Annahmebeschränkungen wegen Betriebsstörungen der Zementwerke (KRESSE et al. 2010). Technisch durch Klärschlamm substituierbar sind etwa 3-5 % der Zementrohstoffe (KRAUS & HAHN 2004a, KRAUS 2003).

Aufgrund der saisonal beeinflussten Asphaltindustrie bietet diese thermische Verwertungsoption die geringste Entsorgungssicherheit, hinzu kommen niedrige Verbrennungstemperaturen und eine nicht auf den Klärschlammeinsatz abgestimmte Rauchgasreinigung (KRAUS & HAHN 2004b). Die Ungewissheit hinsichtlich der Entsorgung und die mit der Entsorgung in der Asphaltindustrie verbundenen umweltrelevanten Emissionen führen zum Ausschluss dieser thermischen Verwertungsoption für die Industriezone Tra Noc.

Die Region um Can Tho ist arm an Mineralien für die Herstellung von Baumaterialien. Die Ton- und Lehmvorkommen sind, vorwiegend für die Herstellung von Ziegel und Kacheln, gut geeignet (VIETNAM LAW & LEGAL FORUM 2014). In der Industriezone Tra Noc und entlang des Flusses Hau gehören Ziegeleien zum Landschaftsbild (siehe Abbildung 3-14). Klärschlamm kann direkt oder als Klärschlammmasche mit 5-10 % TR in der Ziegelindustrie eingesetzt werden (KRAUS & HAHN 2004a). Im Klärschlamm enthaltene Schwermetalle werden laut KRAUS & HAHN (2004a) gut eingebunden, allerdings kommt es zu starken Geruchsbelästigungen durch Schwelgase im Bereich des Trockners und der Anwärmszone, weshalb auf eine Abgasreinigung nicht verzichtet werden kann (KRAUS & HAHN 2004b).



Foto (links): Wasielewski (2013)

Abbildung 3-14: Reisanbauflächen und eine Ziegelei am Ufer des Mekongs

Der Einsatz von Klärschlamm in der Bauindustrie ist von verschiedenen Wissenschaftlern untersucht worden und die Ziegelindustrie als geeignetster Anwendungsbereich dargestellt worden. Die Ziegelqualität entsprach den verfügbaren Anforderungen hinsichtlich der untersuchten Parameter Druckfestigkeit und Wasseraufnahme. Im Hinblick auf umweltrelevante Auswirkungen sind die lösbaren Bestandteile des Endproduktes untersucht worden, die sich als nicht umweltschädlich herausstellten (JOHNSON et al. 2014).

In Vietnam ist die Behandlung und Verwertung von Klärschlamm in der Bauindustrie bis jetzt nicht ausreichend untersucht oder umgesetzt worden (HA et al. 2008). Zwar konnten in den Versuchsreihen von HA et al. (2008) bis zu einem Klärschlammanteil von 5 % die Vietnamesischen Standards eingehalten werden, ökologische und technische Aspekte müssen jedoch in weiteren Versuchen geprüft werden. Die bei dem Klärschlammeinsatz in der Bauindustrie entstehende Rauchgasproblematik ist von den Autoren nicht untersucht worden, wird aber von KRAUS & HAHN (2004b) als zwingend erforderlich dargelegt. Bereits SCHULENBURG (2012) und THANH & MATSUI (2011) wiesen darauf hin, dass in Vietnam die technischen Standards für Gasemissionen nicht eingehalten werden können. Dies ist der Grund, weshalb eine thermische Verwertung des in der Industriezone Tra Noc anfallenden Klärschlammes als kritisch zu betrachten ist.

Die Stadt Can Tho hat keine eigene Abfallverbrennungsanlage zur thermischen Beseitigung von Hausmüll. Die an sieben Krankenhäusern und auf dem Gelände der Can Tho Pesticide Joint Stock Company (CPC) vorhandenen Verbrennungskapazitäten sind bei weitem nicht ausreichend zur vollständigen thermischen Verwertung der Klärschlämme.

Die Stromversorgung der Stadt Can Tho und der Industriezone Tra Noc wird hauptsächlich von zwei Kohlekraftwerken bewerkstelligt, die Kapazitäten von etwa 188 MW (Binh Thuy Bezirk) und 330 MW (O'Mon Bezirk) vorweisen (ASEAN 2014, VOSS & KOSSMANN 2012). In den meisten Kohlekraftwerken kann entwässerter und stabilisierter Klärschlamm mitverbrannt werden, der einen Trockensubstanzgehalt von 25-35 % TR ent-

hält. Rohschlamm bringt bei der Handhabung und Lagerung zu viele Probleme mit sich, wie schlechte Entwässerbarkeit, Gasbildung und Geruchsentwicklung. Klärschlamm mit zusätzlichem Schwermetallanteil macht sich in den Emissionswerten der Kraftwerke bemerkbar und ist mit den Trockenkapazitäten der Kohlemühlen ein weiterer Grund für geringe Mitverbrennungsmengen (bis zu 5 % der Brennstoffmasse) (WIECHMANN et al. 2012).

In Vietnam wird die Mitverbrennung von Klärschlamm derzeit in keinem Kraftwerk umgesetzt. Kritisch sind vor allem die fehlenden Abgasreinigungen zu sehen, die eine extreme Luftverschmutzung verursachen und schädlich für Menschen und Umwelt sind. Zum momentanen Zeitpunkt, ist deshalb von einer Mitverbrennung in den um die Industriezone Tra Noc existierenden Kraftwerken abzusehen.

Deponierung

Die Deponierung wird in der Literatur als ein sicherer Entsorgungsweg für Hausmüll mit minimalen gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen beschrieben (SPERLING et al. 2005b). Diese Aussage trifft nur zu, wenn die Deponierung auf geordneten Mülldeponien mit Sickerwasser- und Gasbehandlung durchgeführt wird, die in Vietnam zum derzeitigen Zeitpunkt selten betrieben werden.

So auch in der Provinz Can Tho, in der zurzeit keine eigene Mülldeponie vorhanden ist. Bis 2004 war die Tan Long Deponie in der Provinz Can Tho ansässig, aber durch Verschiebung der Provinzgrenzen wurde die Deponie der Provinz Hau Giang zugeteilt. Der innerstädtische Abfall wird weiterhin zur Tan Long Deponie transportiert, allerdings stehen dort keine Kapazitäten für die Klärschlammdeponierung zur Verfügung. Auf 47 ha plant die Stadt Can Tho eine Abfallbehandlungsanlage und Mülldeponien im Bezirk O'Mon, der direkt an die Industriezone Tra Noc grenzt (ASEAN 2014).

Aktuell (Stand 03/2015) bestehen somit Schwierigkeiten eine geordnete Deponierung des anfallenden Klärschlammes sicherzustellen. Selbst für Klärschlamm, der als gefährlicher Abfall eingestuft wird, besteht kein gesicherter Deponierungsweg in der Provinz Can Tho. Lediglich die geringen Kapazitäten der Verbrennungsöfen bieten eine Möglichkeit den als gefährlichen Abfall eingestuften Klärschlamm aus der Industriezone Tra Noc zu entsorgen.

Umsetzbare Verwertungs- und Entsorgungsoptionen

Zusammengefasst ist die Ausgangssituation für eine Klärschlammverwertung bzw. -entsorgung in der Region Can Tho und der Industriezone Tra Noc schwierig. Für eine stoffliche Verwertung sind nicht alle anfallenden Klärschlämme in der Industriezone geeignet. Auch wenn diese Einschränkung nicht für die ausgewählten Fallbeispiele gilt, ist dennoch zu beachten, dass in der Industriezone auch Klärschlämme anfallen, die nach den vietnamesischen Richtlinien als gefährlicher Abfall einzustufen sind.

Zudem bieten die Böden um die Industriezone Tra Noc keine einfachen Randbedingungen für eine stoffliche Verwertung. Unangemessene Düngemittelmengen der Landwirte, hohe Grundwasserstände, dauerhafte Überflutung der Nassreisfelder und Monokulturen ohne Fruchtfolge sind nur einige der einschränkenden Aspekte für die stoffliche Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft.

Bei der thermischen Verwertung fehlen vor allem die Abgasbehandlungsanlagen, so dass durch die Mitverbrennung von Klärschlamm oder die Nutzung in der Bauindustrie die Abgasemissionen weiter verschlechtert werden würden. Zurzeit bieten die existierenden Verbrennungsöfen ohnehin nicht genügend Kapazitäten für die gesamte Klärschlammmenge der Industriezone Tra Noc. Durch die fehlenden Kapazitäten und die nicht geordnete Ablagerung ist auch die Deponierung als Klärschlammentsorgungsweg als wenig geeignet einzustufen. Erst nach Inbetriebnahme der Abfallbehandlungsanlage und Mülldeponie im Bezirk O'Mon wird eine Deponierung möglich sein. In Anbetracht einer nachhaltigen Klärschlammverwertung und -entsorgung ist die Deponierung dann nur als Zwischenlösung zu empfehlen.

Lediglich die stoffliche Verwertung erscheint zum derzeitigen Zeitpunkt mit gewissen Einschränkungen und ggf. längeren Transportwegen umsetzbar. Die freien Kapazitäten des CPC-VerbrennungsOfens sollten für eine sichere Entsorgung der als gefährlicher Abfall eingestuften Klärschlämme der Industriezone Tra Noc genutzt werden.

Als nächster Schritt erfolgt eine naturwissenschaftliche Analyse mit der der Stoffhaushalt der Fallbeispiele erfasst, beschrieben und interpretiert werden soll (BACCINI & BRUNNER 2012), um ein ausreichendes Verständnis für die zugrunde liegenden Prozesse zu erhalten (FRISCHKNECHT & SCHMIED 2002). Durch Massenbilanzen bzw. Stoffstromanalysen können die ausgewählten Behandlungstechnologien an die Randbedingungen angepasst werden und gegebenenfalls ungeeignete Behandlungstechnologien identifiziert werden. Die Situationsanalyse und die Anpassung der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen an die Fallstudie Industriezone Tra Noc haben bislang keine Einschränkungen hinsichtlich der ausgewählten Technologievarianten ergeben, weshalb lediglich die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen in der Abbildung 3-15 an die Randbedingungen der Industriezone Tra Noc angepasst werden.

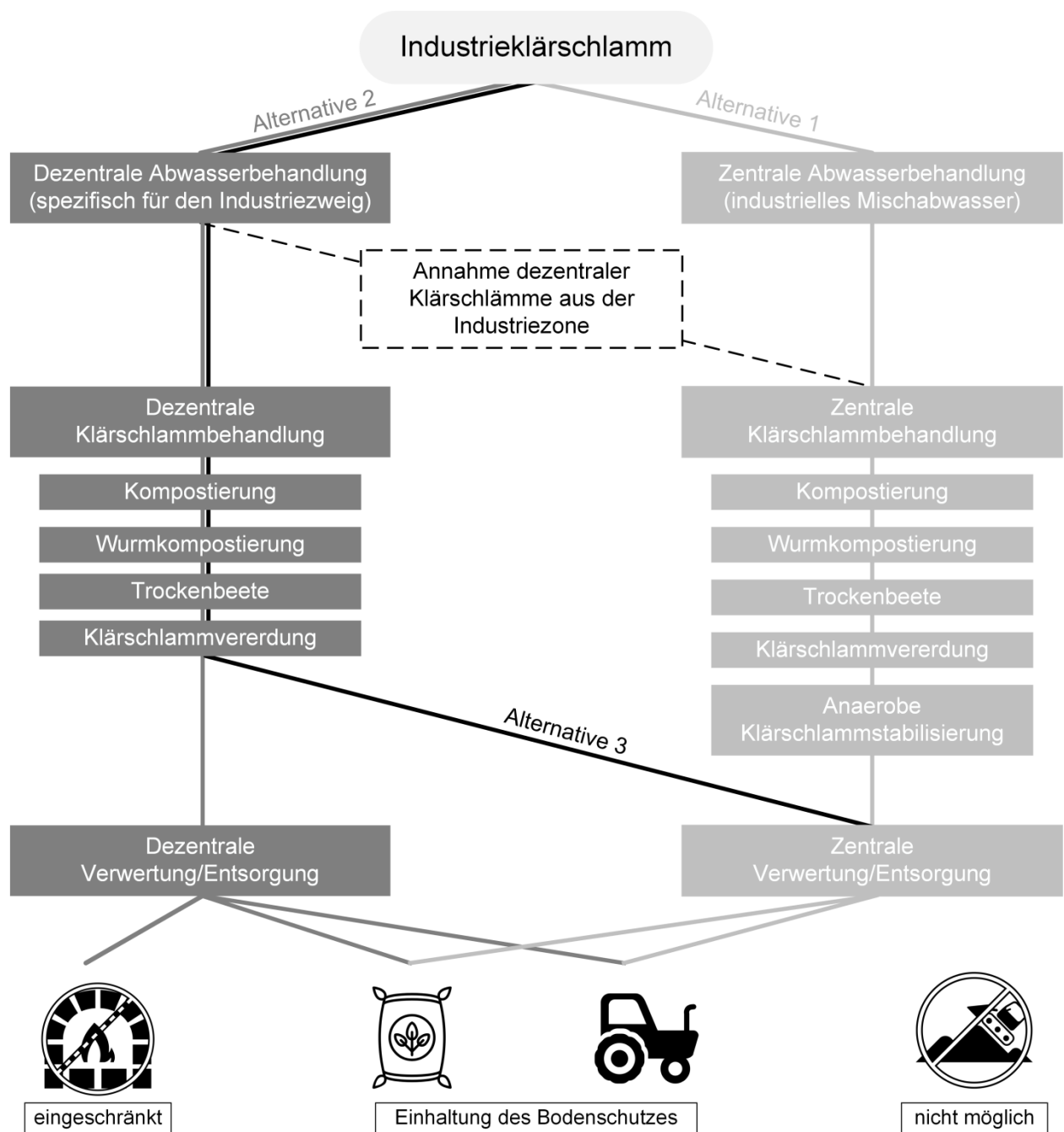


Abbildung 3-15: Alternativen angepasst an die Randbedingungen in der Industriezone Tra Noc

4 Material und Methoden

Zur Systemabbildung durch Stoffstrom- und Energiebilanzen sind Versuchsreihen mit den ausgewählten Technologievarianten in der Industriezone Tra Noc durchgeführt worden. In den folgenden Abschnitten werden der Bilanzraum, die Versuchsanlagen und die Analysemethoden näher beschrieben.

4.1 Ansätze zur Beschreibung von Stoffstrom- und Energiebilanzen

Nach FRISCHKNECHT & SCHMIED (2002) wird eine Systemabbildung in vier Arbeitsschritten dargestellt:

1. Systemdefinition

Zu Beginn steht die Bestimmung des Systems, dessen Stoffhaushalt beschrieben werden soll. Dieses Bilanzierungssystem wird durch eine Reihe von verschiedenen Prozessen bestimmt, die eine räumliche Einheit (Bilanzvolumen) darstellen, wie beispielsweise der Transport von Stoffen und Gütern.

Als Stoffe sind chemische Elemente und Verbindungen zu sehen, während Güter Stoffgemische sind, die von Menschen ökonomisch bewertete Funktionen erfüllen. Über die Systemgrenzen und zwischen den Prozessen fließen somit Güter, die Stoffe in bestimmten Konzentrationen beinhalten. Die Masse eines Gutes oder Stoffes, welche pro Zeiteinheit von einem Prozess zu einem anderen gelangt (z. B. kg/d), wird als Fluss bezeichnet.

Für die ausgewählten Technologievarianten sind zeitliche und räumliche Systemgrenzen sowie Indikatorstoffe zu definieren. Die zeitlichen Systemgrenzen werden durch den Untersuchungszeitraum festgelegt, während Indikatorstoffe bestimmt werden, hier Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Feststoffe sowie ausgewählte Schwermetalle. Tabelle 4-1 zeigt die Untersuchungszeiträume sowie die zu Beginn (1), zum Ende (2) sowie während der Versuchslaufzeit (3) bestimmten Parameter. Details zu den Analyseverfahren werden in Kapitel 4.3 beschrieben.

Tabelle 4-1: Zeitliche Systemgrenzen sowie die analysierten Parameter der untersuchten Technologievarianten

Technologie	Untersuchungszeitraum	Parameter
Kompostierung	2 Wochen Intensivrotte; 7 Wochen Nachrotte	TOC, TKN und TP (1; 2) TR, oTR, pH, LF und T (1; 2; 3)
Wurmkompostierung	je nach Substrat 2-6 Wochen	CSB, CSB _f , TN, NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N, TP, PO ₄ -P, TR, oTR, pH, LF und T (1; 2; 3)

Technologie	Untersuchungszeitraum	Parameter
Trockenbeete und Klärschlammvererdung	6 Wochen je 2 Beschickungen	CSB, CSB _f , TN, NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N, TP, PO ₄ -P, TR, oTR, AFS, pH, LF und T (1; 2; 3)
Anaerobe Klärschlammstabilisierung	7-9 Wochen Adaptionszeit 4 Wochen Intensivmessphase/Batchtest	CSB, CSB _f , TN, NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N, TP, PO ₄ -P, TR, oTR, pH, LF, T, Luftdruck, Gasquantität und -qualität (1; 2; 3)

Die räumlichen Systemgrenzen (Bilanzraum) werden in Kapitel 5.1 näher definiert, analysierte Nährstoffe sowie Schwermetalle sind in Tabelle 5-1 zusammengetragen.

2. Systembeschreibung und Datenerfassung

Nach der Festlegung der Systemgrenzen kann das Arbeitsprogramm zur Datenerfassung festgelegt und nach dessen Inhalt Versuchsreihen der ausgewählten Technologievarianten mit den Klärschlämmen der Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc durchgeführt werden. Die Beschreibung des Systems erfolgt anhand der gemessenen Werte über Güterflüsse und Stoffkonzentrationen.

3. Bilanzierung

Für die Bilanzierung werden Stoffflüsse und deren Bilanz (Vorratsänderung) berechnet. Ein Stofffluss sowie die Vorratsänderung werden folgendermaßen definiert:

Stofffluss = *Güterfluss* * *Stoffkonzentration* und

Vorratsänderung = *Input* – *Output*.

Die Vorratsänderung ist die Zu- oder Abnahme im System, während der Input die dem System zugeführte Stoffmenge und der Output die aus dem System abgeführte Stoffmenge beschreibt. Da den beiden Größen Güterfluss und Stoffkonzentration zeitliche Systemgrenzen gesetzt werden, ändert sich die Stofffracht in Abhängigkeit von der Zeit.

Daraus ergeben sich für die Stoffbilanzen folgende Formeln:

$$B_X(t) = Q(t) * C_X(t) \quad (4-1)$$

$B_X(t)$ = Fracht eines Stoffes X pro Zeiteinheit [kg/d]

$Q(t)$ = zeitabhängiger Güterfluss (Zu- oder Abfluss) [m³/d]

$C_X(t)$ = zeitabhängige Konzentration eines Stoffes X [kg/m³]

und

$$m_X = m_{X,Input} - m_{X,Output} \quad (4-2)$$

m_X	=	Masse eines Stoffes X	[kg]
$m_{X,Input}$	=	Masse eines Stoffes X im Inputpfad	[kg]
$m_{X,Output}$	=	Masse eines Stoffes X im Outputpfad	[kg]

Ist es nicht möglich alle Input- und Outputflüsse messtechnisch oder analytisch zu erfassen, ergeben sich offene Bilanzen, die ggf. sinnvoll mit Literaturdaten ergänzt werden können.

4. Interpretation der Ergebnisse

Ist die Bilanzierung der In- und Outputgrößen der wichtigsten Stoffe des Systems erfolgt, können die für den Stoffumsatz relevanten Prozesse schematisch dargestellt und interpretiert werden. Hierzu können Möglichkeiten zur Steuerung des Systems erkannt und verfahrenstechnische Anpassungen der Prozesse oder Stoffkonzentrationen vorgenommen werden.

4.1.1 Bilanzierungsgrundsätze und Bilanzraum

Als Basis für die Bilanzierung gelten die Erhaltungssätze für Masse und Energie, wie der 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser besagt, dass innerhalb eines geschlossen Systems weder Masse noch Energie verloren gehen kann. Demnach sind Bilanzierungen nur für Stoffe möglich, für die ein Erhaltungssatz existiert. Nach JORDAN (2006) und SCHWEIGHOFER (1994) sind nicht alle abwassertechnisch relevanten Stoffgrößen bilanzierbar. Als geeignet für eine geschlossene Bilanz geben die Autoren die Parameter Total Carbon (TC) und TP an. Nicht bilanzierbar sind z. B. die Stoffgrößen BSB₅ und TOC, denn der bei biologischen Umsetzungsprozessen entstehende anorganische Kohlenstoff (CO₂) wird messtechnisch nicht erfasst. Im Hinblick auf die Stoffbilanzen der Fallstudie kann die Stoffstromanalyse der nicht bilanzierbaren Stoffe wichtige Aussagen über die ablaufenden biologischen Prozesse liefern.

Wasserbilanz

Über die Kreisläufe werden chemische Elemente, die in drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig vorliegen können, in der Biosphäre transportiert. Dies geschieht in den betrachteten Bilanzräumen der Klärschlammbehandlungstechnologien über die wesentliche Inputquelle Klärschlamm. Als Nebenpfade sind je nach Behandlungstechnologie Strukturstoffe und in Bezug auf den Wasserhaushalt der Niederschlag als nasse Deposition zu berücksichtigen. Wichtige Outputpfade sind neben dem Sickerwasserpfad, die Evaporation (Verdunstung an Oberflächen) und die Transpirationsleistung der Schilfpflanzen (Verdunstung über die Blätter). Theoretisch müsste zudem die beim mikrobiologischen Abbau der Organik (Dissimilation) erzeugte bzw. verbrauchte Wasser-

menge in der Bilanz berücksichtigt werden. Da die Stoffbilanzen hauptsächlich zur Beurteilung der Alternativen dienen und nicht komplex betrachtet werden sollen, wird diese Wassermenge aufgrund des geringen Anteils am Wasserhaushalt vernachlässigt.

Der Wasserhaushalt des Bilanzraumes ist für die Beurteilung der Entwässerungsleistung von Bedeutung. Die qualitative Veränderung des eingebrachten Klärschlammes und die Stabilisierungsvorgänge erhöhen den Trockenrückstandsgehalt im Schlamm und führen so zu einer Massenreduktion.

Trockensubstanz und organische Substanz

Wie erwähnt, ist aufgrund der biologischen Umsetzungsprozesse eine geschlossene Bilanzierung des Feststoffgehaltes und der organischen Substanz nicht möglich. Jedoch ermöglicht eine nicht geschlossene Bilanz wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Feststoffbelastung, Endfeststoffgehalt und Grad der Mineralisierung.

Die im Inputmaterial enthaltene organische Substanz wird durch die Einzelmassen an oTR bzw. TOC abgebildet, da die Bestimmung des TOC nicht bei allen Untersuchungsreihen möglich war, wurde neben der oTR-Bestimmung der Parameter CSB bestimmt. Die Feststoffe sowie die organische Substanz können den Bilanzraum lediglich über den Sickerwasserpfad verlassen, soweit dieser bei den ausgewählten Technologievarianten vorhanden ist. Die Differenz der Feststoffmassen verbleibt im Bilanzraum. Hat ein weitergehender mikrobiologischer Abbau stattgefunden, muss die Differenz aus Input- und Outputpfaden im Bilanzraum positiv sein (JORDAN 2006).

Der anaerobe und aerobe Abbau der organischen Substanz wird von Mikroorganismen zum Kohlenstoff- und zur Energiegewinnung (Dissimilation) durchgeführt. Der aufgenommene Kohlenstoff dient dem Aufbau von Biomasse. Bei vollständigem aerobem Abbau entstehen des Weiteren CO_2 und H_2O , während anaerob das energetisch nutzbare Methan (CH_4) sowie CO_2 gebildet werden. Diese verlassen den Bilanzraum als gasförmige Emissionen (Outputpfade; siehe Abbildung 4-1), liegen allerdings nicht als Messwert vor, sondern gehen lediglich aus der Differenz der Input- und Outputpfade hervor. Bei den anaeroben Versuchsansätzen wurde die Methanproduktion anhand der Biogasmenge abgeleitet.

Stickstoffkreislauf im Bilanzraum

Zusätzlich zur Inputquelle Klärschlamm besteht die Möglichkeit, atmosphärischen Stickstoff N_2 durch die biologische N_2 -Fixierung oder die Deposition (trocken und nass) in den Bilanzraum einzutragen, solange dieser nicht als geschlossenes System vorliegt (siehe Intensivrotte der Kompostierung und anaerobe Klärschlammstabilisierung).

In anoxischen Bereichen des Bilanzraumes kann durch heterotrophe Organismen der Nitrat-Stickstoff in elementaren, gasförmigen Stickstoff N_2 (Denitrifikation) umgewandelt werden und in die Atmosphäre entweichen. Sind im Bilanzraum Pflanzen oder Tiere

enthalten, kann Stickstoff assimiliert werden. Liegt ein anaerobes Milieu vor, wie bei der untersuchten anaeroben Klärschlammbehandlung, sind die Stickstoffumwandlungen zu vernachlässigen. Abbildung 4-1 zeigt einen exemplarischen Bilanzraum mit möglichen In- und Outputpfaden.

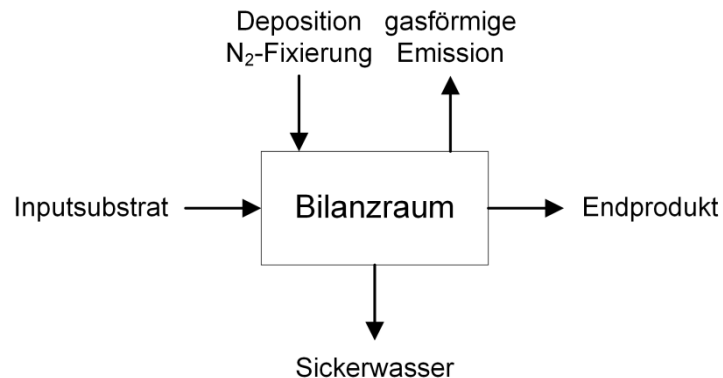


Abbildung 4-1: Exemplarischer Bilanzraum

Phosphorkreislauf im Bilanzraum

Ein Phosphoreintrag in den Bilanzraum ist lediglich durch den Klärschlammeintrag sowie die Deposition bei offenen Behandlungsanlagen möglich. Im Niederschlag liegt der Phosphor gelöst als Phosphat (PO_4^{3-}) vor. Das energiereiche Phosphat-Anion wird von Pflanzen und Tieren direkt aufgenommen. Da Phosphor aber vorrangig in gebundener Form vorliegt, wird das Phosphat durch Desorption von sorbiertem Phosphor, durch Auflösung von anorganischen Phosphaten (z. B. Ca- oder Mg-Phosphat) sowie durch Mineralisierung von organischem Phosphor bereitgestellt (JORDAN 2006). Organische Substanz, in der organisches Phosphat gebunden ist, kann durch den mikrobiellen Abbau zu pflanzenverfügbaren Phosphaten umgewandelt werden.

Als Outputpfad kommt lediglich der Sickerwasserpfad infrage, da Phosphor unter natürlichen Bedingungen keine gasförmigen Verbindungen eingeht.

Schwermetallkreislauf im Bilanzraum

Eingetragen werden können die Schwermetalle vorwiegend durch den Klärschlammepfad, aber auch eine atmosphärische Deposition ist möglich. Gibt es im Bilanzraum einen Sickerwasserpfad, werden Schwermetalle hierdurch ausgetragen. Bei bestimmten Behandlungstechnologien, wie Klärschlammvererdung und Wurmkompostierung, besteht als Outputpfad zusätzlich die Aufnahme durch die Pflanzen oder Tiere.

Löslichkeit und Mobilität von Schwermetallen sind stark pH-abhängig und nehmen grundsätzlich mit abnehmenden pH-Wert zu (SCHEFFER et al. 2002). Zu den mobilsten Schwermetallen zählen Cadmium, Zink und Nickel, deren Mobilität bereits bei einem pH-Wert <6,5 beginnt (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Im sauren Milieu ist deshalb eine Schwermetallausschwemmung über den Sickerwasserpfad möglich. Existiert dieser nicht, werden die Schwermetalle, pH-Wert abhängig gelöst oder gebunden, mit dem

behandelten Klärschlamm aus dem System ausgetragen und der ausgewählten Verwertungsoption zugeführt. Deshalb werden in den nachfolgenden Kapiteln 5.1.1 - 5.1.4 insbesondere die Schwermetallgehalte der Endprodukte betrachtet. Ebenso wird mit den Nährstoffen Kalium, Calcium und Magnesium verfahren.

Da sowohl die Inputpfade als auch der Bilanzraum durch die beschriebenen Prozesse beeinflusst werden, sind weder die Güterflüsse noch die Stoffkonzentrationen mathematisch als stetig anzusehen. Bei den Technologievarianten Trockenbeet, Klärschlammvererdung und anaerobe Klärschlammstabilisierung wird dem Bilanzraum während des Untersuchungszeitraums in regelmäßigen Abständen Klärschlamm zugeführt, so dass eine unstetige Funktion vorliegt. Die Summe der einzelnen Stoffmassen muss somit über den gesamten Untersuchungsraum t_{ges} ermittelt werden. Es gilt demnach bei diesen Technologien:

$$m_X = \sum_{t_{ges}} m_{X,i} = \sum_{t_{ges}} (B_{X,i} * t_i) \quad (4-3)$$

m_X = Masse eines Stoffes X über den Untersuchungszeitraum [kg]

$m_{X,i}$ = Masse eines Stoffes X zum Zeitpunkt t_i [kg]

$B_{X,i}$ = Fracht eines Stoffes zum Zeitpunkt t_i [kg/d]

t_i = Zeitpunkt oder Zeitraum (gewählt) [d]

Für die Kompostierung sowie die Wurmkompostierung liegen die Stoffmassen zu Beginn des Versuchsansatzes und am Versuchsende vor. Über den Untersuchungszeitraum wird kein weiterer Klärschlamm dem System zugeführt, so dass keine zeitliche Abhängigkeit besteht. Die Stoffmassen können daher vereinfacht aus der Differenz zwischen der Stoffmasse am Versuchsende t_e und zu Versuchsbeginn t_0 errechnet werden.

$$m_X = Q_{X,e} * C_{X,e} - Q_{X,0} * C_{X,0} \quad (4-4)$$

m_X = Masse eines Stoffes X über den Untersuchungszeitraum [kg]

$Q_{X,0}$ = Güterfluss zu Versuchsbeginn [kg]

$Q_{X,e}$ = Güterfluss zu Versuchsende [kg]

$C_{X,0}$ = Konzentration eines Stoffes zu Versuchsbeginn [kg/m³]

$C_{X,e}$ = Konzentration eines Stoffes zu Versuchsende [kg/m³]

Die Fracht aus Güterfluss und Stoffkonzentration kann sowohl aus der Stoffmasse als auch aus dem Stoffvolumen gebildet werden.

Energiebilanz

Für eine umfassende Bilanzierung fließt neben den Strom- und Wärmeverbräuchen

Für den Energiebilanzvergleich in der Fallstudie Industriezone Tra Noc wird der Energiebedarf für die Produktion von Maschinen und Baustoffen vernachlässigt. In die Bilanzierung gehen daher der Stromverbrauch für den Betrieb, der Dieselbedarf für den Radlader, der Bedarf an technischer Wärme und die Energierückgewinnung je nach Technologievariante ein. Als Bilanzierungszeitraum wird ein Jahr gewählt. Auf die Umrechnung in den spezifischen Primärenergiebedarf wird aus pragmatischen Gründen verzichtet, da die Energiewerte in die Kostenaufstellung einfließen.

4.2 Versuchsaufbauten

Die Versuchsreihen der als geeignet erarbeiteten Technologievarianten sind in der Industriezone Tra Noc durchgeführt worden. Die Aufstellung eines Versuchscontainers mit anaeroben Anlagen sowie die Nutzung des Außengeländes für die übrigen Versuchsreihen fanden auf dem Gelände des in der Industriezone ansässigen Wasserwerkes statt. Die Versuchsflächen befanden sich in direkter Nähe zum Laborcontainer, so dass eine zeitnahe Analytik der Proben sichergestellt werden konnte. Der zu behandelnde Klärschlamm wurde aus den Kläranlagen der drei Fallbeispiele (Fischverarbeitung, Chitinherstellung und Brauerei) bezogen. Eine Charakterisierung des Inputmaterials für die Klärschlämme ist in Tabelle 3-3 zu finden. Da sich das Zentralklärwerk zum Zeitpunkt der Versuchsreihen noch im Bau befand, wurden zur Annäherung an den Klärschlamm des Zentralklärwerks Mischschlämme angesetzt. Diese wurden aus der Fischverarbeitung, Chitinherstellung und Getränkeindustrie bezogen, da in der ersten Betriebsphase des Zentralklärwerks hauptsächlich Abwasser dieser Industriezweige behandelt werden sollte.

Um eine Übertragung der Versuchsaufbauten auf die Rahmenbedingungen und Großtechnik zu ermöglichen, sind bei den Versuchsaufbauten, soweit möglich, örtliche Materialien und eine einfache Bauweise verwendet worden.

4.2.1 Kompostierung

Der erste Schritt für die Untersuchung der Klärschlammkompostierung ist die Auswahl von geeignetem organischem Strukturmaterial. Als Kriterien waren für die Industriezone Tra Noc geringe Kosten und eine gute Verfügbarkeit des Strukturmaterials ausschlaggebend. Zudem sollte eine Konkurrenz der Strukturmaterialien mit anderen Verwertungswegen (z. B. Nutzung von Holzhäckseln als Brennholz) vermieden werden. Dies führte dazu, dass die zwei Abfallprodukte Rindenmulch und Kokosfasern für die Kompostierungsversuche ausgewählt wurden.

Die Intensivrotte wurde in Rotteboxen durchgeführt, die mit einem Drainagevlies (Terra-fix®), einer Zwangsbelüftung sowie einer Abluftf Erfassung ausgestattet waren. Da in der Industriezone Tra Noc keine Möglichkeit bestand TOC und TKN zu bestimmen, wurden die Kompostansätze mit üblichen Mischungsverhältnissen aus der Literatur angesetzt

und das C/N-Verhältnis durch die spätere Analyse in Deutschland überprüft. Um die notwendige Reduzierung des Wassergehaltes vor dem Einbau in die Intensivrotte durchzuführen, fand eine Entwässerung der Klärschlämme in Trockenbeeten mit einer Sand-Kies-Drainage statt. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die verwendeten Strukturmaterialien, deren Mischungsverhältnis sowie den Anfangswassergehalt.

Tabelle 4-2: Mischungsverhältnisse der verwendeten Strukturmaterialien sowie die Wassergehalte

Klärschlamm	Mischungsverhältnis [Vol-%]	Wassergehalt [%]	Trockenrückstand [%]
Fischverarbeitung			
<i>Kokosfasern</i>	70:30	87,8	12,2
<i>Rindenmulch</i>	70:30	70,9	29,1
Chitosanherstellung			
<i>Kokosfasern</i>	70:30	74,2	25,8
<i>Rindenmulch</i>	70:30	67,0	33,0
Brauerei			
<i>Kokosfasern</i>	60:40	71,6	28,4
<i>Rindenmulch</i>	60:40	67,9	32,1
Zentralkläwerk (Mischschlamm)			
<i>Kokosfasern</i>	60:40	82,2	17,8
<i>Rindenmulch</i>	60:40	68,4	31,6

Nach der 14-tägigen Intensivrotte folgte eine offene Nachrotte über sieben Wochen. Die Mieten der Nachrotte wurden überdacht gelagert und regelmäßig gewendet sowie bei Bedarf befeuchtet. Die Befeuchtung war in Folge der humiden örtlichen Klimaverhältnisse durchschnittlich alle 3-4 Tage notwendig, um den optimalen Wassergehalt bei 70 % zu stabilisieren. Sowohl während der Intensivrotte als auch in der Nachrotte wurde die Temperatur der Mieten regelmäßig händisch gemessen. Abbildung 4-3 zeigt den Versuchsaufbau der Rotteboxen sowie den Einbau der Zwangsbelüftung.

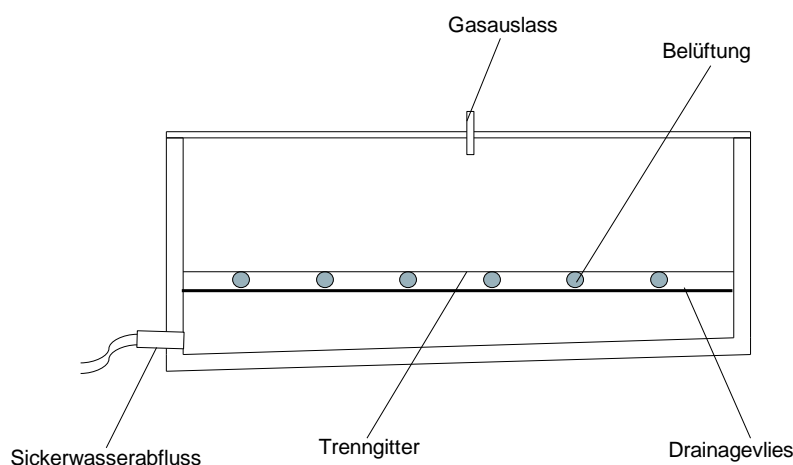


Abbildung 4-3: Rotteboxen für die Intensivrotte mit Zwangsbelüftung

4.2.2 Wurmkompostierung

Zur Untersuchung der Wurmkompostierung wurden von einem kleinen Bauernhof (ca. 20-25 Kühe) in der Nähe der Industriezone Tra Noc Kompostwürmer bezogen, die zur Kompostierung von Kuhdung und als Tierfutter (Weiterverkauf) genutzt wurden.

Die Kompostwürmer benötigen einen Wassergehalt von 80-90 %, um im Klärschlamm überleben zu können. Weshalb auch bei dieser Versuchsreihe eine Entwässerung der Klärschlammproben in Trockenbeeten mit Sanddrainage vorab notwendig war. Je 20 kg entwässertem Klärschlamm wurden 1 kg Kompostwürmer hinzugegeben und in Styroporboxen kompostiert. Tabelle 4-3 enthält die Wassergehalte zu Beginn t_0 und zum Ende t_e der Versuchsreihe.

Tabelle 4-3: Wassergehalt zu Beginn und Ende der Wurmkompostierung

Klärschlamm	Wassergehalt t_0 [%]	Wassergehalt t_e [%]
Fischverarbeitung	85,7	73,1
Chitosanherstellung	84,3	78,4
Brauerei	86,3	74,7
Zentralkläwerk (Mischschlamm)	82,8	75,4

Zum Schutz der Würmer vor Vögeln, Eidechsen und Schlangen wurden die Boxen mit einem feinmaschigen Tuch abgedeckt und zur Vermeidung von Niederschlagseintrag überdacht. Wöchentlich fand eine Probenahme und Analyse der in Tabelle 4-2 aufgeführten Parameter statt. Abbildung 4-4 stellt die verwendeten Kompostwürmer sowie die Wurmkompostierung in den Styroporboxen dar.



Abbildung 4-4: Kompostwürmer und die Wurmkompostierung in den Styroporboxen

4.2.3 Trockenbeete und Klärschlammvererdung

Zur natürlichen Entwässerung von Klärschlamm wurden Versuchsreihen in konventionellen Trockenbeeten und zur Klärschlammvererdung durchgeführt. Die Versuchsbehälter wurden mit einer Sand-Kies-Drainage, 15 cm Grobsand (0-8 mm) und 10 cm Mittelkies (8-16 mm), ausgestattet. Für die Klärschlammvererdung wurde in die Sandschicht Schilf (*Phragmites australis*) gepflanzt, das vorab aus einem natürlichen Bestand in der Nähe der Industriezone Tra Noc entnommen wurde. Der Schilfbestand hatte in den Vererdungsbeeten zu Beginn eine Dichte von 32 Pflanzen/m² und wurde in der ersten Woche durch Bewässerung mit Kläranlagenablauf an erhöhte Nähr- und Schadstoffkonzentrationen adaptiert.

Abbildung 4-5 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau der Trocken- und Vererdungsbeete.

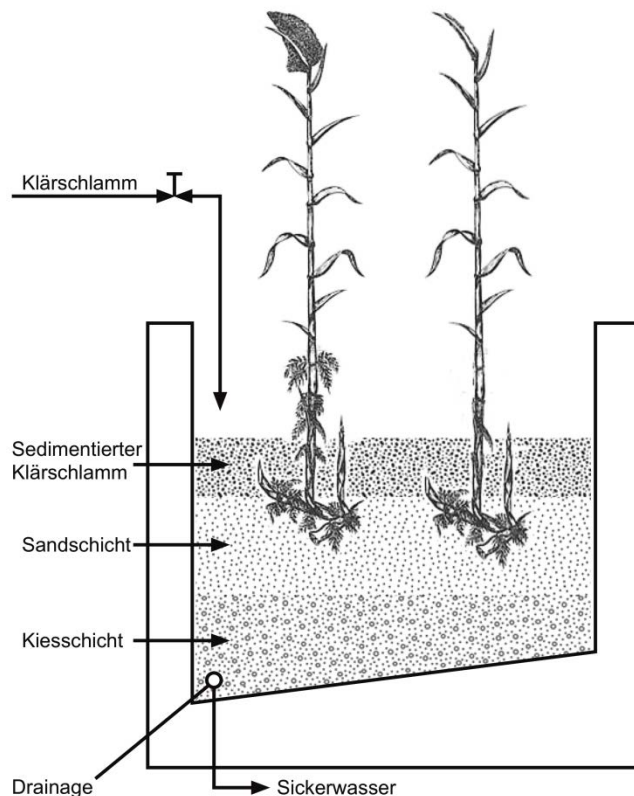


Foto (unten): Ng (2013)

Abbildung 4-5: Schematischer Versuchsaufbau, Versuchsfläche und Beschickung der Trocken- sowie Vererdungsbeete

Zum Vergleich der Entwässerungs- und Mineralisierungsleistung wurde parallel zur Klärschlammvererdung eine Versuchsreihe mit Trockenbeeten durchgeführt, deren Aufbau identisch war. Die Beetoberfläche betrug bei beiden Versuchsreihen $0,315 \text{ m}^2$ und wurde während des Untersuchungszeitraums nicht überdacht. Eine Beschickung der Versuchsbeete fand zweimal wöchentlich mit Überschussschlamm statt, der mit Hilfe eines Pralltellers gleichmäßig auf der Beetoberfläche verteilt wurde. Das Sicker- und Niederschlagswasser wurde in einem Kanister aufgefangen und wöchentlich analysiert. Zudem wurde der Schlammboden regelmäßig untersucht sowie die biometrischen Daten des Pflanzenbestandes aufgenommen. Die Versuchsreihen fanden zur Trockenzeit über einen Zeitraum von 12 Wochen statt, wobei die Feststoffbelastungen zwischen 53 und 120 kg TR/m^2 lagen.

4.2.4 Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Die Untersuchungen zur anaeroben Klärschlammstabilisierung wurden sowohl als Batchansätze sowie in Versuchsreaktoren durchgeführt.

Anaerobe Batchtests

Unter anaeroben Bedingungen wurden die Versuchsansätze als Batch in Anlehnung an die DIN 38414-S8 (1985) über die Dauer von vier Wochen durchgeführt. Als Impf-

schlamm diente ausgefaulter Klärschlamm aus der Industriezone Tra Noc oder den eigenen Versuchsreaktoren, welcher gemeinsam mit dem zu untersuchenden Substrat bei einer Temperatur von $35 \pm 1^\circ\text{C}$ im Wasserbad angesetzt wurde. Das zu untersuchende Substrat sowie der Impfschlamm (Blindprobe) wurden parallel in dreifacher Ausführung eingebaut.

Abbildung 4-6 veranschaulicht den schematischen Aufbau der Batchanlage im Versuchscontainer in der Industriezone Tra Noc.

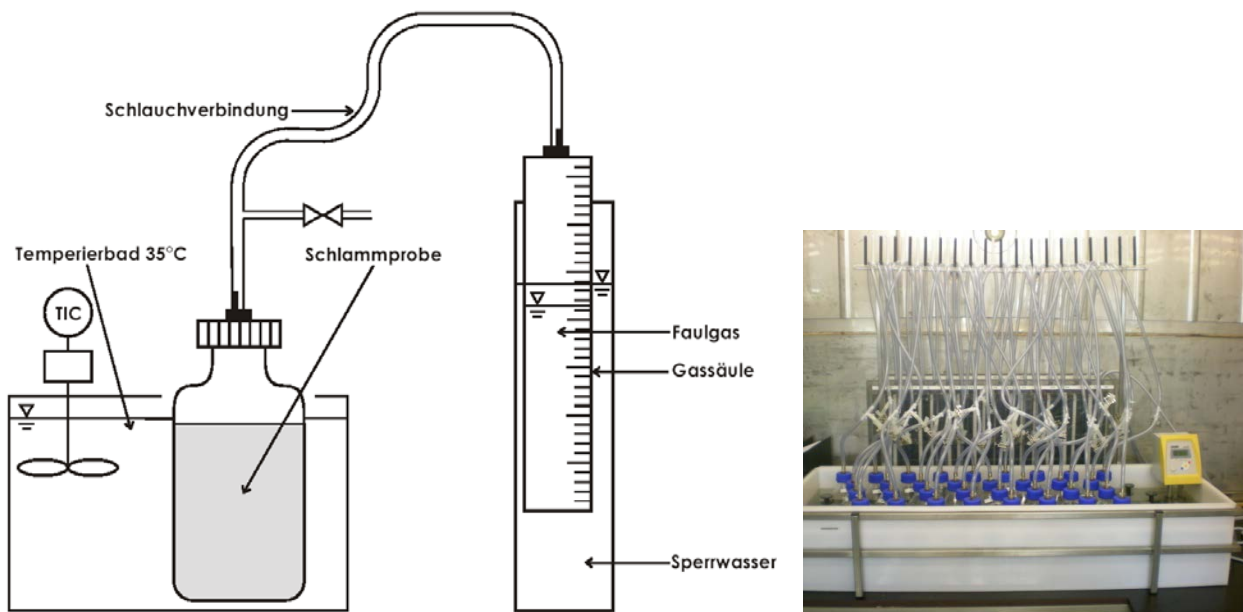


Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau der anaeroben Batchtests sowie die Batchanlage im Versuchscontainer

Das produzierte Gasvolumen gelangte über eine Schlauchverbindung in zwei ineinander liegende Kunststoffzylinder und verdrängte dort eine Sperrflüssigkeit (Salzwasser). Das Gasvolumen wurde täglich abgelesen und unter Berücksichtigung der aktuellen Raumtemperatur und des Luftdruckes auf Normbedingungen umgerechnet. Als Bezugsgröße für die Gasmenge dienten die zugeführten organischen C-Verbindungen (CSB_{zu}) und der zugeführte organische Trockenrückstand (oTR_{zu}) im Substrat.

Die Untersuchungen zur Desintegration wurden mit dem gleichen Versuchsaufbau durchgeführt, allerdings fand eine chemische Vorbehandlung der Klärschlämme statt. Für die saure Desintegration wurde eine 10 %ige Salzsäure verwendet und der Klärschlamm auf den pH-Wert 2 eingestellt. Mit einer 2-molaren Natronlauge wurde der pH-Wert für die alkalische Desintegration auf 11,5 angehoben. Die anschließende Reaktionszeit für die Desintegration lag bei 60 min. und 140°C im Trockenschrank. Nach der Abkühlung wurde der chemisch desintegrierte Klärschlamm gemeinsam mit dem Impfschlamm in verschiedenen Konzentrationen und als dreifacher Ansatz in die Batchanlage eingebaut.

Für die Ermittlung der spezifischen Gasausbeute bei der Co-Vergärung wurden zwei in der Industriezone Tra Noc anfallende Reststoffe ausgewählt und als Co-Substrate gemeinsam mit einem Impf-Klärschlammgemisch in die Batchanlage eingebaut. Das als Co-Substrat eingesetzte Fischfett wird als Abfallprodukt bei der Verarbeitung in den Fischbetrieben hergestellt, während das zweite Co-Substrat, Grünschnitt, von den in der Industriezone Tra Noc vorhandenen Grünflächen und Rasenstreifen stammte.

Anaerobe Versuchsreaktoren

Die Versuchsreaktoren für die anaerobe Klärschlammstabilisierung hatten ein Nutzvolumen von 30 L und waren mit einer automatisch gesteuerten Umwälzvorrichtung, einem Gasmesssystem sowie Zu- und Ablaufstutzen ausgestattet. Je Substrat wurden drei verschiedene Aufenthaltszeiten festgelegt, 21 Tage, 16,7 Tage und 12 Tage. Die Fütterung erfolgte täglich mit einer Edelstahlspritze über den Füllstutzen, um so wenig Luft wie möglich in das anaerobe System einzutragen. Um einen stabilen anaeroben Abbau zu erreichen, wurde der Versuchscontainer konstant im mesophilen Temperaturbereich bei 35°C gehalten. Neben der Analytik des Zulaufs erfolgte während der Adaptionszeit zweimal wöchentlich eine Überprüfung der CSB-Konzentration, der organischen Säuren und der Feststoffgehalte im Ablauf der Versuchsreaktoren. Als Impfschlamm diente Schlamm aus einem Anaerobreaktor in der Industriezone Tra Noc. Abbildung 4-7 zeigt den schematischen Aufbau und die tägliche Beschickung der Versuchsreaktoren.

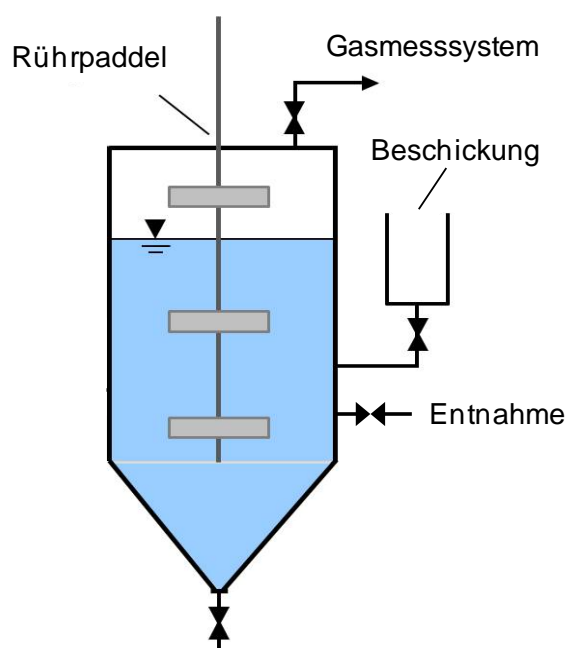


Abbildung 4-7: Schematischer Aufbau und die tägliche Beschickung der Versuchsreaktoren zur anaeroben Klärschlammstabilisierung

Bei der Verfahrenskombination, anaerobe Klärschlammstabilisierung mit anschließender Entwässerung in Trocken- und Vererdungsbeeten, wurden die täglichen Abläufe des

Faulbehälters (Fischverarbeitung) als Mischprobe gesammelt. Die anschließende Beschickung der Trocken- und Vererdungsbeete (Aufbau, Verfahrensweise und Analytik siehe Kapitel 4.2.3) mit dem Faulschlamm fand zweimal wöchentlich über einen Zeitraum von acht Wochen statt. Die Trockenbeete waren bei dieser Versuchsreihe überdacht.

4.3 Physikalische und chemische Analysemethoden

Die unterschiedlichen Medien der untersuchten Technologievarianten Klärschlamm (S), Schlammboden (Bo), Sickerwasser (Si), Kompost (K), Wurmkompost (W) und Biogas (G) wurden mit den in Tabelle 4-4 dargestellten physikalischen und chemischen Analysemethoden bestimmt.

Tabelle 4-4: Physikalische und chemische Bestimmungsmethoden

Parameter		Medium	Einheit	Methode
Trockenrückstand	TR	S, Bo, K, W	[kg/m³]	DIN EN 12880: 2001-02
Glühverlust/Glührückstand	GV/GR	S, Bo, K, W	[%]	DIN EN 15935:2012-11
Abfiltrierbare Stoffe	AFS	Si	[mg/L]	DIN 38409-2: 1987-03
Elektrische Leitfähigkeit	LF	S, Bo, K, W, Si	[mS/cm]	DIN EN 2788:1993-11 DIN ISO 11265:1997-06
pH-Wert	pH	S, Bo, K, W, Si	[-]	DIN EN 12176:1998-06
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	S, Bo, W, Si	[mg/L]	COD _{lab} (LAR 2013); photometrisch, Küvettestest Dr. Lange
Organischer Kohlenstoff	TOC	K		EN 1484:1997
Biologischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	Si	[mg/L]	DIN EN 1899-1:1998-05
Gesamtstickstoff	TN	S, Bo, W, Si	[mg/L]	DIN EN ISO 11905-1:1998-08
Kjeldahl Stickstoff	TKN	K	[mg/L]	Amerikanisches Einheitsverfahren (Standard Methods, 12. Auflage, 1965), NH ₃ -Messung mit ionenselektiver Sonde (Digital Ion-Analyzer, Orion Model 801 A)
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	S, Bo, W, Si	[mg/L]	DIN 38406-5:1983-10
Nitrit-Stickstoff	NO ₂ -N	S, Bo, W, Si	[mg/L]	DIN 38405-D10:1991

Parameter		Medium	Einheit	Methode
Nitrat-Stickstoff	NO ₃ -N	S, Bo, W, Si	[mg/L]	DIN 38405-D9:1979-2
Gesamtphosphor	TP	S, Bo, K, W, Si	[mg/L]	DIN EN ISO 6878-D11:1983-4
Orthophosphat	PO ₄ -P	S, Bo, W, Si	[mg/L]	DIN EN ISO 6878-D11:1983-4
Biogas	CO ₂ ; H ₂ S	G	[%]	Dräger Röhrchen
Organische Säuren		S	[mg/L]	Küvettest Macherey-Nagel
Nährstoffe/Schwermetalle		S, Bo, K, W	[mg/kg]	DIN EN ISO 11885:2009-9
Rottegrad	[-]	K	[-]	BGK (1998)
Kressetest	[-]	K	[-]	BGK (1998)
<i>Escherichia Coli</i>		S, Bo, K, W, Si	[MPN/g]	DIN-Fachbericht 148:2006-6 Nährmedium: 3M™ Petrifilm™ Platten

Die Bestimmung der physikalischen und chemischen Parameter fand bis auf TOC und TKN (Analyse im Labor des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig) im Laborcontainer in der Industriezone Tra Noc statt. Zur Probenaufbereitung wurden die Originalproben mit einem Hochleistungsdispersierer (Ultra-Turrax) homogenisiert. Anschließend erfolgte zur Bestimmung der gelösten und partikulären Fraktion ein Zentrifugieren der Originalproben und Filtrieren des Zentrats mit Membranfiltern (0,45 µm).

5 Systemabbildung ausgewählter Fallbeispiele der Industriezone Tra Noc

Als Grundlage von ökologischen Beurteilungen sind Stoff- und Energiebilanzen erforderlich, denn sie bilden die Basis für die umweltpolitischen Entscheidungen im Unternehmen, insbesondere hinsichtlich der angestrebten Umweltentlastung (STREBEL 1992). Stoff- und Energiebilanzen liefern den Unternehmen Daten für umweltrelevante Entscheidungen, zur Schwachstellenerkennung im Umweltbereich sowie für die Zielbildung hinsichtlich eines nachhaltigen Konzeptes (POSCH & KLINGSPIEGL 2012). Ziel ist es, die Umwelt im Vergleich zu schlechteren Alternativen zu entlasten (POSCH & KLINGSPIEGL 2012), also trotz Veränderungen im Ökosystem eine relative Umweltschonung zu erreichen.

Es ist allerdings laut POSCH & KLINGSPIEGL (2012) zu beachten, dass Bewertungsmethoden benötigt werden, mit denen die Mengengrößen der verschiedenen Stoff- und Energiearten vergleichbar gemacht werden, um eindeutige Entscheidungen zu treffen (siehe Kapitel 6). In den nachfolgenden Unterkapiteln wird exemplarisch das Fallbeispiel der Fischverarbeitung betrachtet.

5.1 Nährstoff- und Schwermetallanalyse

Bei der Abwasserreinigung werden bei den verschiedenen Behandlungsschritten (mechanisch, biologisch und chemisch-physikalisch) organische und anorganische Inhaltsstoffe aus dem Abwasser entfernt und über den Luft- oder Schlammpfad aus dem System ausgeschleust. Einige dieser Inhaltsstoffe eignen sich hervorragend als Dünger, während andere nicht erwünscht sind aufgrund der mit ihnen verbundenen gesundheitlichen und ökologischen Risiken (SPERLING et al. 2005b).

Wie bereits in Kapitel 2.6.1 beschrieben, ist die Konzentration und Menge der Nähr- und Schadstoffe stark abhängig von den industriellen Abwasserinhaltsstoffen und den vorliegenden Reinigungsprozessen. Für ein nachhaltiges ökologisches Schlammkonzept mit dem Ziel der stofflichen Verwertung ist deshalb die beste wirtschaftlich erreichbare Schlammqualität anzustreben (SPERLING et al. 2005b). Die für die Industriezone Tra Noc angestrebte stoffliche Verwertung der anfallenden Industrieklärschlämme kann nur als praktikable Verwertungslösung herangezogen werden, wenn negative Auswirkungen auf die Umwelt vermieden werden. Die nachfolgende Tabelle beinhaltet einige der häufigsten im Klärschlamm enthaltenen Nähr- und Schadstoffe, die während der Versuche in der Industriezone Tra Noc analysiert wurden.

Tabelle 5-1: Analyisierte Nähr- und Schadstoffe im Klärschlamm der Industriezone Tra Noc

Nährstoffe		Schadstoffe	
<i>Hauptnährstoffe</i>	<i>Spurenstoffe</i>	Cadmium (Cd)	Nickel (Ni)
Kohlenstoff (C)	Kalium (K)	Chrom (Cr)	Blei (Pb)
Stickstoff (N)	Calcium (Ca)	Kobalt (Co)	Zink (Zn)
Phosphor (P)	Magnesium (Mg)	Kupfer (Cu)	

Stickstoff weist von den Nährstoffen den höchsten wirtschaftlichen und pflanzlichen Nutzwert in Klärschlämmen auf (SPERLING et al. 2005b), denn er ist einer der grundlegenden Bestandteile zahlreicher Biomoleküle (z. B. Aminosäuren) und damit Hauptnährelement der Pflanzen und Bodenorganismen. Der organisch vorliegende Stickstoff, bildet zwar den größten Anteil (ca. 70-90 %) des Klärschlammes, ist aber erst nach der Stickstoffmineralisation der heterotrophen Mikroorganismen als anorganisches Ammonium (NH_4^+) pflanzenverfügbar. Neben den NH_4 -Ionen sind die anderen anorganisch vorliegenden Stickstofffraktionen (Nitrit und Nitrat) ebenfalls leicht pflanzenverfügbar (SCHEFFER et al. 2002). Die hohe Wasserlöslichkeit der anorganischen Stickstoffverbindungen ist zwar hilfreich für die Pflanzenaufnahme, der Nachteil der hohen Mobilität dieser Verbindungen liegt jedoch in der möglichen Belastung von Grund- und Oberflächenwasserkörpern infolge von Auswaschungsprozessen.

Ein weiterer wichtiger Makronährstoff ist Phosphor, der zum Aufbau von Phospholipiden (Membranen) benötigt wird. Darüber hinaus ist Phosphor ein Bestandteil des Energieträgers Adenosintriphosphat (ATP) sowie von Nukleinsäuren und ist damit lebensnotwendig für das Wachstum und die Resistenz der Pflanzen (JORDAN 2006). Der Phosphoranteil im Klärschlamm stammt hauptsächlich aus Reststoffen, Bakterienzellen sowie aus phosphathaltigen Waschmitteln und Seifen (SPERLING et al. 2005b). Der große Vorteil von Phosphor im Klärschlamm ist die langsame und kontinuierliche Freisetzung durch die Mobilisierung von sorbiertem Phosphor, das Auflösen der anorganischen Phosphate (Ca- oder Mg-Phosphat) sowie die Mineralisierung von organischem Phosphor (SCHEFFER et al. 2002). Laut GISI (1997) kann Phosphor zwar durch Leaching aus dem Boden ausgetragen werden, der Verlust ist aber aufgrund der geringen Löslichkeit gering.

Die im Klärschlamm enthaltene organische Substanz ist ein exzellenter Bodenverbesserer, der die physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften, im Wesentlichen das Pflanzenwachstum und die Pflanzenentwicklung, verbessert (SPERLING et al. 2005b). Dies ist bedingt durch die mikrobiellen Umsetzungen die zu einem intensiven Um- bzw. Abbau der organischen Substanz führen und bereits bei den

Behandlungstechnologien zu einem Abbau der organischen Substanz beitragen. Für die Bestimmung des Mineralisierungsgrades der verschiedenen Behandlungstechnologien im Bilanzraum werden der chemische Sauerstoffbedarf und die Feststoffe (Trockenrückstand und Glühverlust) herangezogen.

Calcium, Magnesium und Kalium sind im Klärschlamm in geringeren Konzentrationen, aber in leicht pflanzenverfügbarer Form vorhanden (SPERLING et al. 2005b). Sie zählen neben Stickstoff, Phosphor und Schwefel zu den Makronährstoffen. Kalium ist beispielsweise für die Permeabilität der Membran und zur Aktivierung von verschiedenen Enzymen sowie den Wasserhaushalt und Stoffwechsel der Pflanze notwendig (MENGEL 1991), weshalb Kalium ein Hauptbestandteil von chemischen Düngemitteln ist.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass auch die aufgelisteten Schadstoffe zu den Mikronährstoffen der Pflanzen zählen und in kleinen Mengen essentiell für das Pflanzenwachstum sind. Erst wenn die Stoffe in höheren Konzentrationen auf den Boden ausgebracht werden, wirken sie toxisch auf die Bodenorganismen, die Pflanzen sowie den Menschen und werden als Schadstoffe eingestuft (MENGEL 1991, SPERLING et al. 2005b).

Für die im Bilanzraum ablaufenden Umsetzungsprozesse sind verschiedene Mikroorganismen verantwortlich, jedoch gibt es auch pathogene Mikroorganismen, die ein Risiko für Mensch und Tier darstellen. Hierzu zählen: Bakterien, Viren, Darmwürmer und Protozoen, die in ihrer Konzentration stark mit den spezifischen Herkunftsbereichen des Abwassers variieren. Während der Absetzprozesse der Abwasserreinigung werden die pathogenen Mikroorganismen an die sedimentierenden Stoffe gebunden und befinden sich in höheren Konzentrationen im Klärschlamm (SPERLING et al. 2005b). Die pathogenen Mikroorganismen beeinträchtigen die Qualität des Endproduktes und können die Verwertungsoption einschränken.

Je nachdem, welche Behandlungstechnologie im Bilanzraum betrachtet wird, können bereits während der Klärschlammbehandlung relevante Umwandlungsprozesse der Nähr- und Schadstoffe stattfinden. Eine detaillierte Darlegung der Prozesse sowie der stofflichen In- und Outputpfade wird in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgenommen.

5.1.1 Kompostierung

In Vietnam sind zwei Arten der Kompostierung zu finden: Zum einen die Hauskompostierung (Kleinmaßstab) bei der land- und forstwirtschaftliche Reststoffe sowie Fäkalien kompostiert werden, um Dünger für die eigenen Felder oder zum Verkauf zu produzieren. Zum anderen die industrielle Kompostierung (Mittel- bis Großmaßstab) mit dem Ziel den anfallenden Biomüll zu entsorgen und gleichzeitig die Entsorgungskosten zu reduzieren (ARNOLD 2010).

Aufgrund der intensiven Landwirtschaft im Mekong Delta sind neben den hier untersuchten Industrieklärschlämmen genügend Biomassequellen für die Kompostierung vorhanden. Im Umfeld der Industriezone Tra Noc ist die Kompostierung nicht verbreitet, auch die Stadt Can Tho betreibt keine Kompostierungsanlage (ARNOLD 2010, NGUYEN & LE 2011, WIENEKE 2005). Als Grund für die geringe Verbreitung im Mekong Delta nennen die Autoren ARNOLD (2010), LE HUNG (2003) und NGUYEN & LE (2011) den unzureichenden Wissensstand hinsichtlich der Kompostierung und dem Einsatz von organischen Düngemitteln, der zu mehr Mineraldüngern in der Landwirtschaft führt. Nichtsdestotrotz konnte ARNOLD (2010) auf lokalen Märkten in der Region um Can Tho folgende Kompostarten vorfinden:

- kommerzieller trockener „Biodünger“ in abgepackten 500 g Packungen (Inhaltsstoffe nicht deklariert)
- getrockneter Rindermist; Verkauf lose oder verpackt
- Kompost von anaeroben Schlamm; direkter Hofverkauf für 1.000 VND/kg
- Zuckerrohrschlamm.

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der Kompostierung ist ein vorhandener Absatzmarkt. Die Erkenntnisse von ARNOLD (2010) zeigen, dass zumindest eine geringe Nachfrage nach organischen Düngern in der Region besteht. Da hauptsächlich der unzureichende Wissensstand als Grund für die geringe Verwendung von organischen Düngern angeführt wird, muss im Zuge der stofflichen Verwertung der Klärschlammkomposte eine entsprechende Marketingstrategie erarbeitet und Schulungen der Landwirte durchgeführt werden. Erst hierdurch kann der produzierte Klärschlammkompost erfolgreich in der Landwirtschaft eingesetzt werden.

Da die Zugabe von Strukturmaterial bei der Klärschlammkompostierung zwingend erforderlich ist, die Situationsanalyse geringe Kosten als ein wichtiges Zielkriterium hervorgebracht hat, war die zweite Voraussetzung für eine erfolgreich umzusetzende Kompostierung der Einsatz von Strukturmaterial aus dem direkten Umfeld der Industriezone Tra Noc ohne Konkurrenz mit anderen Verwertungswegen und guter Verfügbarkeit.

Eines der Hauptabfallprodukte der Kokosnussproduktion ist die strukturstabile und faserige Schale (LE HUNG 2003), die an den Straßenrändern um die Industriezone Tra Noc getrocknet und anschließend verbrannt wird. Neben den Kokosfasern sind als Abfallprodukte der Industrie Holzspäne und Rindenmulch zu finden, die sich in der Praxis bereits als gutes Strukturmaterial für die Kompostierung herausgestellt haben (BIDLINGMAIER & BICKEL 1980, BIDLINGMAIER & BICKEL 1980, SHAMMAS & WANG 2007a, SPERLING et al. 2005b). Abbildung 2-1 zeigt das verwendete Strukturmaterial nach der Mischung mit den untersuchten Klärschlämmen in den Rotteboxen.



Abbildung 5-1: Verwendetes Strukturmaterial vor und nach der Mischung mit Klärschlamm

Bei der Kompostierung, wie sie in der Industriezone Tra Noc durchgeführt wurde, sind die im Folgenden dargestellten In- und Outputflüsse in die Bilanzierung der Nährstoffe eingegangen.

Tabelle 5-2: Systemgrößen der Kompostierung

Input	Output	Bilanzraum
Klärschlamm	Verdunstung*	Miete der Intensivrotte
Strukturmaterial	Gasemissionen (C und N)*	Miete der Nachrotte
Belüftung		

* Fehlbetrag der Massenbilanz

Da die Intensivrotte in geschlossenen Boxen durchgeführt wurde, ist eine stoffliche Deposition vernachlässigbar. Die Nachrotte, als zweiter Bilanzraum, fand in überdachten Mieten statt, so dass auch hier die stoffliche Deposition als vernachlässigbar gering anzusehen ist.

Nach der zweiwöchigen Intensivrotte ist davon auszugehen, dass die leicht verfügbaren C-Quellen bereits abgebaut wurden. Die Abbildung 5-2 zeigt den Stoffstrom für die Klärschlammkompostierung mit Rindenmulch am Beispiel der Fischverarbeitung.

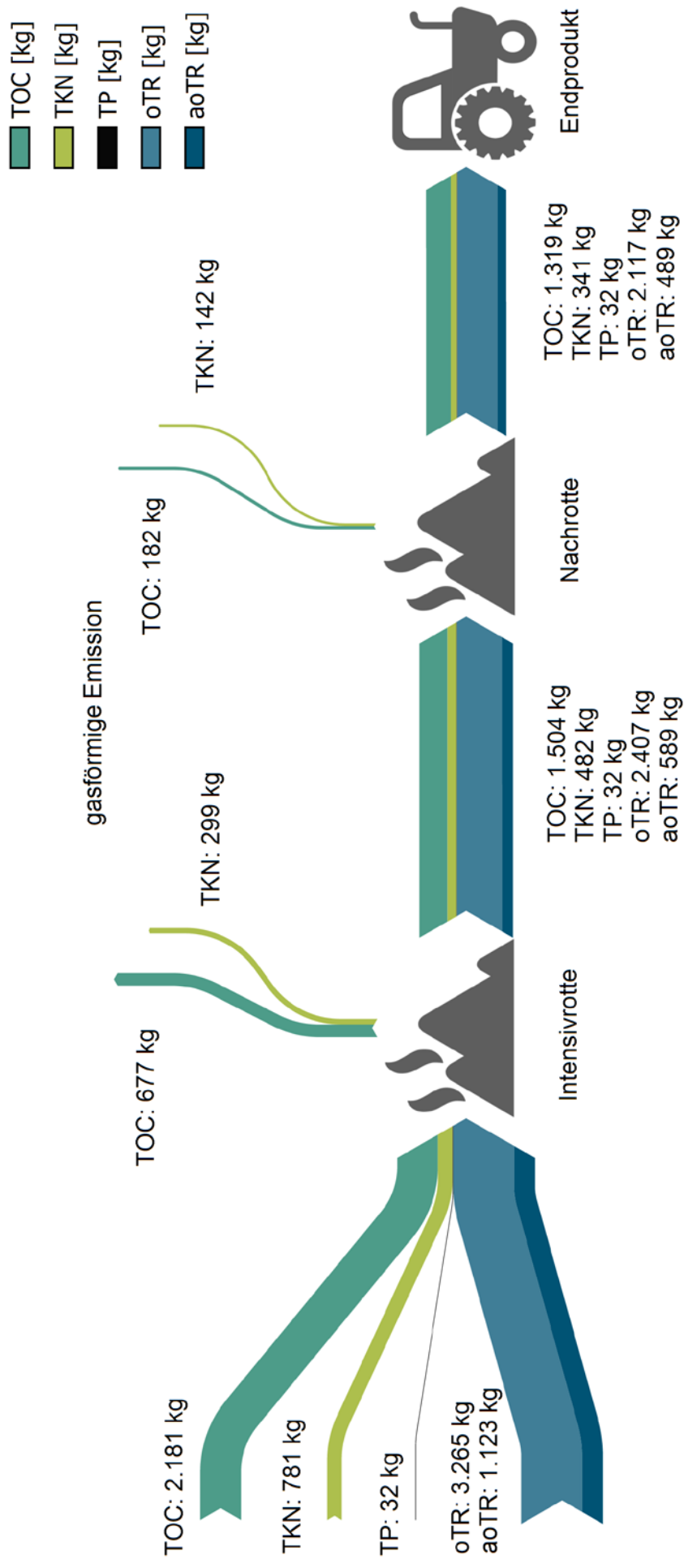


Abbildung 5-2: Stoffbilanz der Kompostierung mit Rindenmulch

Hinweis: Bei allen stofflichen Sankey-Diagrammen stellt der aoTR die anorganische Fraktion, den Glührückstand, dar. Addiert mit dem oTR, der organischen Fraktion, ergibt sich der TR-Gehalt.

Biologische Prozesse werden von den unterschiedlichsten Faktoren beeinflusst, die den Prozessablauf verlangsamen oder hemmen. Um einen stabilen Prozess während der Kompostierung zu gewährleisten, werden die Haupteinflussfaktoren bzw. die Kontrollparameter auf ein Optimum für die Mikroorganismen eingestellt. In Tabelle 5-3 sind die Haupteinflussfaktoren aufgeführt und kurz beschrieben. Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Einflussfaktoren diskutiert.

Tabelle 5-3: Haupteinflussparameter der Klärschlammkompostierung

Parameter	Beschreibung
<i>Temperatur</i>	Mikroorganismen bauen organische Substanz ab und produzieren dabei Wärme als Nebenprodukt. Die optimale Temperaturbereich liegt zwischen 30-55°C. Bei niedrigen Temperaturen wird der Abbauprozess verlangsamt. Die Temperatur dient als Kontrollparameter für den Prozess.
<i>Sauerstoff</i>	Für den aeroben Abbauprozess ist Sauerstoff zwingend erforderlich. Der benötigte Sauerstoffbedarf für eine hohe Abbaurate liegt bei 0,8-2 g O ₂ /kg TR*h. Durch den Sauerstoffeintrag werden Geruch, CO ₂ und Wärme aus der Miete ausgetragen.
<i>Wassergehalt</i>	Der optimale Wassergehalt in der Anfangsphase (Intensivrotte) liegt bei 55-70 %, so dass eine Klärschlammmentwässerung vorab notwendig ist. Für die mikrobiologische Aktivität liegt der minimale Wassergehalt in der Nachrotte zwischen 12-25 %, optimal ist 45-60 %. Der Endkompost sollte für der Siebung und Verpackung einen Wassergehalt 35-50 % aufweisen.
<i>Oberfläche</i>	Eine größere Oberfläche beschleunigt den Abbau der organischen Substanz, weshalb eine Zerkleinerung des Materials förderlich ist.
<i>C/N-Verhältnis</i>	In der Anfangsphase sollte das C/N-Verhältnis bei 20-40 liegen. Ein niedrigeres C/N-Verhältnis führt zu einem gasförmigen N-Verlust, ein höheres C/N-Verhältnis zu einer langsamen Abbaurate.

Quelle: HAUG (1980), BIDLINGMAIER & GOTTSCHALL (2000), AMLINGER et al. (2005), ARNOLD (2010)

Temperatur

Die Durchschnittstemperatur in Can Tho liegt bei 27°C, so dass eine zusätzliche Wärmezufuhr bei der Kompostierung nicht erforderlich ist. Es besteht eher die Gefahr, dass das Kompostmaterial in der Trockenzeit befeuchtet werden muss, um einen ausreichenden Wassergehalt für die mikrobiologische Aktivität zu gewährleisten. Zur Prozesskontrolle ist die Temperatur in den Mieten während Intensiv- und Nachrotte regelmäßig überprüft worden. Sowohl die Innen- als auch die Außentemperatur der Mieten lagen konstant über der Umgebungstemperatur. Im Innenraum der Mieten konnte in den ersten Tagen der Intensivrotte eine Temperatur über 40°C festgestellt werden, die allerdings nur einen Tag anhielt. Danach stellte sich die Innentemperatur, die mit der Umgebungstemperatur schwankte, auf einen Bereich zwischen 30-35°C ein.

Abbildung 5-3 zeigt das Temperaturprofil für den Versuchsansatz mit Kokosfasern (Versuchsansatz mit Holz nahezu identisch).

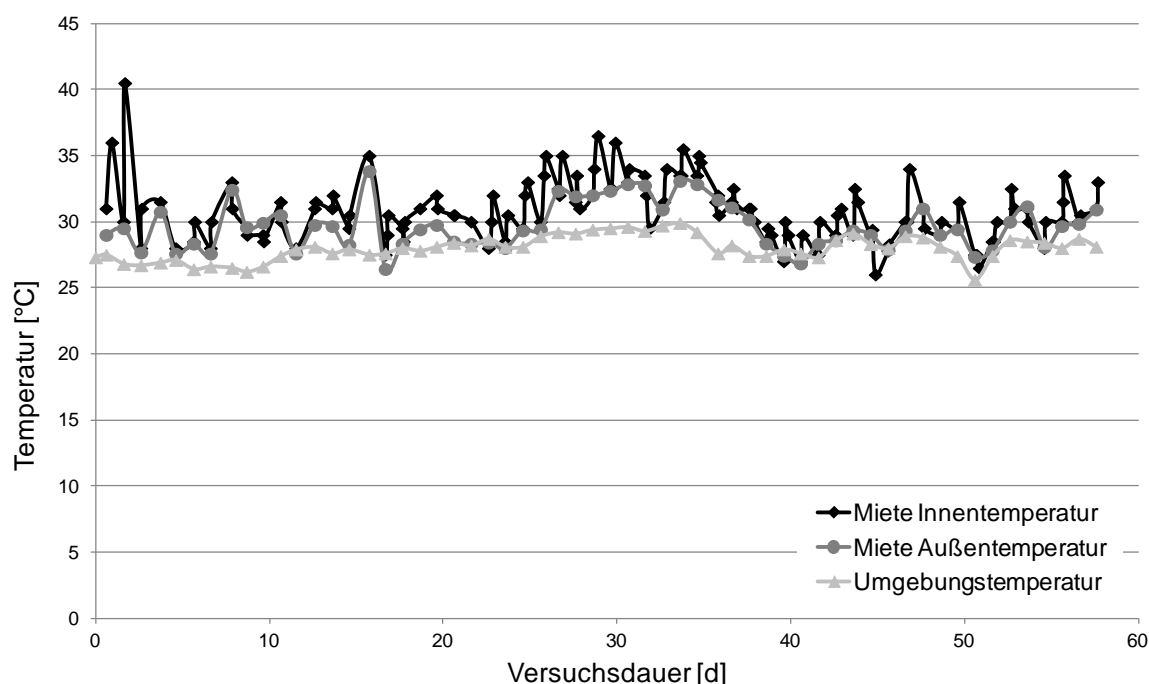


Abbildung 5-3: Temperaturentwicklung der Kompostierung über den Bilanzierungszeitraum

Nach einer Adaption vermehren sich die mesophilen Mikroorganismen in der Intensivrottephase exponentiell und die Temperaturen können durch die vermehrten Stoffwechseltätigkeiten bis in den thermophilen Bereich (Heißphase) steigen (BAUERFELD 2012). In den untersuchten Kompostierungsansätzen konnten keine Temperaturen im thermophilen Temperaturbereich festgestellt werden. Nach SPERLING et al. (2005b) deutet ein Temperaturbereich zwischen 40-60°C in den ersten drei Tagen auf einen adäquaten Prozess hin, der im vorliegenden Temperaturprofil erreicht wurde. Auch ARNOLD (2010) beobachtete bei ihren Kompostierungsversuchen in Can Tho eine geringe Selbsterhitzung und führt als Grund die fehlenden, leicht abzubauenen Nährstoffe an. Hiervon ist bei den vorliegenden Versuchen erst in der Nachrotte auszugehen.

Aufgrund der tropischen Lage der Industriezone Tra Noc ist als weiterer Einflussfaktor die Luftfeuchtigkeit zu betrachten, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Kompostqualität haben kann (LE HUNG 2003). Gerade eine hohe Luftfeuchte, wie sie in der Fallstudie vorlag, wirkt sich negativ auf die beteiligten Mikroorganismen aus. Bei steigender Luftfeuchte werden die Pilze durch die Bakterien gehemmt und der Rotteprozess verschlechtert sich (LE HUNG 2003). Die relative Luftfeuchte lag während des Versuchszeitraums zwischen 70-85 %. Da während der Intensivrotte durchgängig belüftet wurde, ist davon auszugehen, dass die im System vorliegende Feuchtigkeit ausgetragen und der

Rotteprozess nicht negativ beeinflusst wurde. Die im Anschluss an die Nachrotte durchgeführten Qualitätstests schließen einen negativen Einfluss der Luftfeuchte auch in der Nachrotte aus.

C/N-Verhältnis

Das anfängliche C/N-Verhältnis, das die Energiequelle für die Kompostierung widerspiegelt, lag mit 28 bei dem Ansatz mit Rindenmulch im Optimalbereich. Der Ansatz mit Kokosfasern hingegen lag mit einem C/N-Verhältnis von 16 unter dem Optimum. Eine Stickstofflimitierung liegt bei zu hohen C/N-Verhältnissen vor, bei denen die Mikroorganismen nicht genügend Stickstoff für ihr Wachstum vorfinden, wodurch die Abbaurate und damit die Temperatur sinkt (BIDLINGMAIER & GOTTSCHALL 2000, SPERLING et al. 2005b). Bei den vorliegenden niedrigen C/N-Verhältnissen wird Ammoniak gestrippt, was die Kompostqualität beeinflusst (KROGMANN 2001). Wie die Stoffbilanz der Kompostierung für die Fischverarbeitung zeigt (siehe Abbildung 5-2), werden bereits in der Intensivrotte bei beiden Ansätzen etwa 60 % des vorhandenen Stickstoffs umgewandelt. BECK-FRIIS et al. (2001) konnten bei ihren Versuchen ebenfalls N-Emission von mehr als 60 % messen. Die N-Emissionen bestanden aus 98 % $\text{NH}_3\text{-N}$, das bei Temperaturen $>30\text{-}40^\circ\text{C}$ aufgrund der Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts vermehrt entsteht (AMLINGER & PEYR 2003), und $<2\%$ $\text{N}_2\text{O-N}$, ein Zwischenprodukt der Nitrifikation. Da kein Sickerwasser während der Kompostierung gebildet wurde, bleibt als Austragspfad lediglich die vermehrte gasförmige Emission, die zu einem höheren C/N-Verhältnis (Kokosfasern 41; Rindenmulch 84) im Endprodukt der Kompostierung geführt hat.

Wassergehalt

Für die Zersetzung der organischen Substanz während des Kompostierungsprozesses ist der Wassergehalt von entscheidender Bedeutung, der bei beiden Ansätzen in der Anfangsphase bei etwa 70 % lag. Diese hohen Wassergehalte werden zwar für Strukturmaterialien wie Stroh und Reisschalen empfohlen (ARNOLD 2010), können aber die Sauerstoffpassage durch das Haufwerk verhindern und anaerobe Zonen entstehen lassen (KROGMANN 2001, SPERLING et al. 2005b, DRÜCKER 2009). Beim Abbau des Kohlenstoffs, der in den Kompostansätzen bei etwa 40 % lag, kann bei einem anaeroben Milieu Methan an der Gesamtkohlenstoffemission einen Anteil von bis zu 2-3,6 % einnehmen (AMLINGER & PEYR 2003).

In der Nachrotte wurde aufgrund der hohen Temperaturen besonderes Augenmerk auf den Wassergehalt gelegt und die Ansätze zeitweise befeuchtet. Trotz der zusätzlichen Wasserzugabe wurde eine Volumenreduktion von über 90 % in beiden Ansätzen erreicht. BAUERFELD (2012) konnte belegen, dass bei steigenden Temperaturen eine erhöhte Massenreduktion und ein erhöhter Stoffumsatz vorliegen. Die höhere Stoffumsatzrate wirkt sich vorwiegend in der Intensivrotte auf den Abbau der organischen

Substanz aus. Dies konnte bei den Versuchen in der Industriezone Tra Noc bestätigt werden.

Der TOC-Gehalt wurde in der Intensivrotte bereits um 41 % (Kokosfasern) bzw. 31 % (Rindenmulch) reduziert. In der Nachrotte wurden lediglich noch weitere 2 % (Kokosfasern) bzw. 9 % (Rindenmulch) TOC abgebaut. Vergleichbar mit den TOC-Abbauraten ist die Reduktion der TKN-Gehalte (Intensivrotte 38-40 %; Nachrotte weiterer Abbau um 20 % bei Rindenmulch). Folglich kann angenommen werden, dass die leicht abbaubaren und verfügbaren Nährstoffe in der Intensivrotte abgebaut wurden und die Stagnation (Kokosfasern) bzw. Verlangsamung des Abbaus organischer Substanz an den in der Nachrotte vorliegenden, schwer abbaubaren Nährstoffen der zellulosehaltigen Strukturmaterialien liegt.

Für eine anschließende Siebung, Vermarktung und Verpackung des Klärschlammkompostes empfiehlt KROGMANN (2001) einen Endwassergehalt von unter 35 %, der hier gegeben ist. Bei dem hohen Trockengehalt des Endproduktes ist allerdings die staubförmige Emission zu beachten.

Ein wichtiger Aspekt der Kompostierung ist die Herstellung eines nützlichen und vielseitig einsetzbaren Endproduktes. Zur Abschätzung einer guten Kompostqualität sind in Tabelle 5-4 die wichtigsten Parameter zur Qualitätsbeurteilung dargestellt.

Tabelle 5-4: Hauptparameter für die Bewertung der Kompostqualität

Parameter	Beschreibung
<i>pH-Wert</i>	Der pH-Wert ist wichtig für die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen, weshalb ein neutraler pH-Wert angestrebt wird. Ein pH-Wert unter 5 deutet auf einen noch nicht ausreichenden Rottegrad hin und mögliche phytotoxische Inhaltsstoffe.
<i>Nährstoffe</i>	Die von den Pflanzen entzogenen Nährstoffe müssen dem Boden durch die Düngung zurückgeführt werden, damit die Pflanzen optimale Bedingungen zum Wachstum erhalten. Eine ausgewogene Nährstoffverteilung ist wichtig.
<i>Schwermetalle</i>	Eine zu hohe Konzentration an Schwermetallen wirkt toxisch auf Pflanzen.
<i>Stabilisierung</i>	Ein reduzierter Sauerstoffverbrauch und eine geringe CO ₂ -Konzentration durch niedrige mikrobielle Aktivität stehen als Indikatoren für einen abgeschlossenen Kompostierungsprozess.
<i>pathogene Mikroorganismen</i>	Um eine Krankheitsübertragung zu vermeiden, sind bestimmte Konzentrationen an pathogenen Mikroorganismen nicht zu überschreiten.

Quelle: AMLINGER et al. (2005), ARNOLD (2010), HAUG (1980), SPRINGER (2011)

Nährstoffe, Schwermetalle und pH-Wert

Phosphat und Kalium liegen im Kompost fast vollständig pflanzenverfügbar vor und haben eine hohe Düngeneffizienz, ähnlich wie Mineraldünger (SPRINGER 2011). Über den Kompostierungszeitraum sind die Konzentrationen an TP, Ca, K und Mg als stabil anzunehmen, da sie in der Umwelt nur gebunden vorkommen und nicht als gasförmige Emission das System verlassen können. In den Stoffbilanzen ist deshalb exemplarisch TP aufgeführt.

Dennoch kann es innerhalb des Bilanzraums zu Umwandlungsprozessen kommen, die die gebundenen Nährstoffe in eine pflanzenverfügbare Form bringen. Ebenso sind Schwermetalle biochemisch nicht abbaubar und im Fall der Kompostierung lediglich über das Endprodukt aus dem Bilanzraum auszutragen. Da der pH-Wert der Endprodukte >6 war, ist eine erhöhte Mobilität der Schwermetalle ausgeschlossen (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997). Um die Qualität des Klärschlammkompostes hinsichtlich der Nährstoffe und Schwermetalle zu überprüfen, werden die Konzentrationen in den nachfolgenden Abbildungen mit Nährstoffkonzentrationen aus der Literatur (Tabelle 2-9) sowie geltenden Schwermetallgrenzwerten der BioABFV (1998) verglichen.

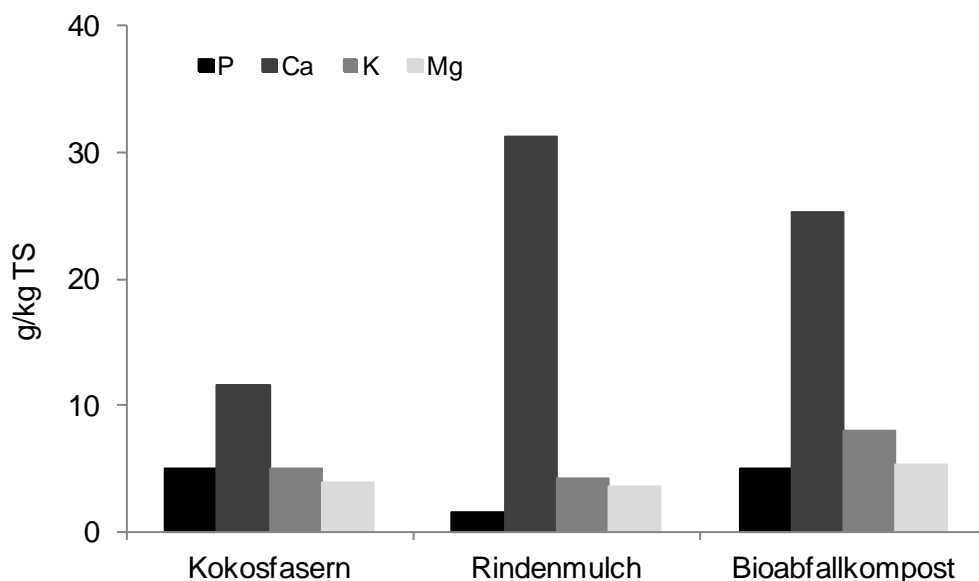


Abbildung 5-4: Nährstoffkonzentrationen der Kompostansätze im Vergleich mit Bioabfallkompost

Im Vergleich mit deutschem Bioabfallkompost sind die Nährstoffgehalte in den Endprodukten geringer. Eine Ausnahme bilden der P-Gehalt (Kokosfasern) der mit fast 5 g/kg TR und der Ca-Gehalt (Rindenmulch) mit 31 g/kg TR. Inwieweit diese geringen Nährstoffgehalte die Kompostqualität beeinflussen, wird mit dem anschließend diskutierten Kresstest sowie der Überprüfung der Atmungsaktivität gezeigt. Die Schwermetallkonzentrationen der Kompostansätze liegen deutlich unter den Grenzwerten der BioABFV (1998). Einer stofflichen Verwertung des Kompostmaterials steht aus Sicht der Schwermetallkonzentrationen nichts entgegen.

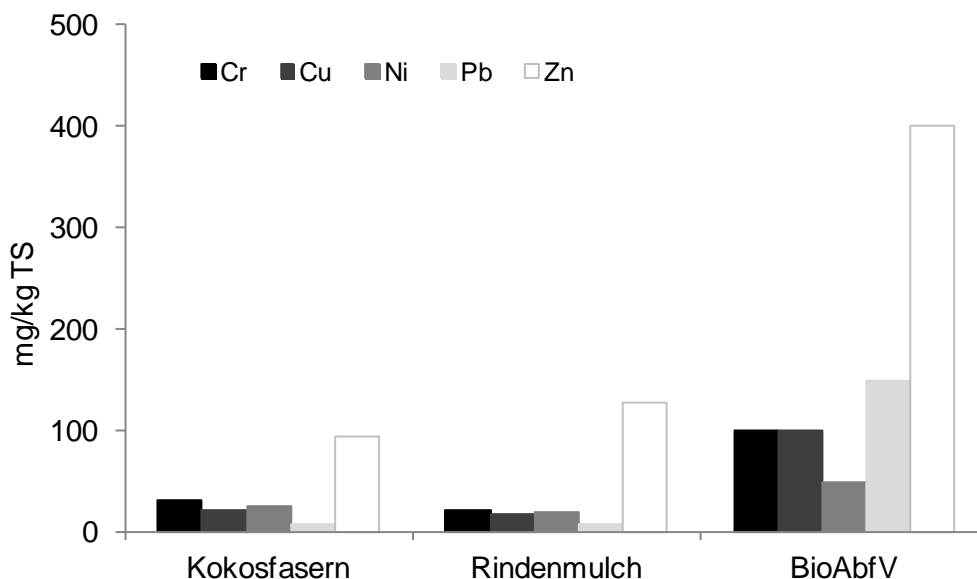


Abbildung 5-5: Schwermetallgehalte der Kompostansätze im Vergleich mit den Grenzwerten der BIOABfV (1998)

Im Anschluss an die Nachrotte ist ein Pflanzentest mit Kressesamen durchgeführt worden. Hierzu wurden drei Wiederholungen in den Verhältnissen 50:50 und 25:75 Blumenerde zu Kompost angesetzt. Die Kressesamen wurden gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt und nach sieben Tagen erfolgte die Bonitur der Versuchsansätze. Anschließend wurde ein Frischgewichtsvergleich der Kressepflanzen des Referenzansatzes (Blumenerde) mit den produzierten Klärschlammkomposten durchgeführt, um die Düngeneffizienz des Klärschlammkompostes zu ermitteln.

Ein deutlich höheres Pflanzenwachstum als der Referenzansatz wies der Kompost mit Rindenmulch auf (Rindenmulch 7,0 g; Referenz 5,3 g). Das Frischgewicht beim Kokosfaseransatz mit 1,3 g deutet auf eine eher schlechte Düngewirkung hin. Die Kokosfasern bieten zwar eine große Oberfläche für die Mikroorganismen, sind aber aufgrund der faserigen zellulose- und ligninhaltigen Struktur (KATKAR 2010) für den biologischen Abbau schwer zugänglich und die Nährstoffe liegen in wenig pflanzenverfügbarer Form vor. KATKAR (2010) beschreibt die Strukturkombination aus Lignin und Zellulose als hart und starr, die widerstandsfähiger als Teakholz während des Rotteprozesses sind. Die hohe Reißfestigkeit der Kokosfasern erschwert zusätzlich die Zerkleinerung des Kompostmaterials.

Stabilisierung und pathogene Mikroorganismen

Die BGK (1998) weist anhand der Atmungsaktivität über vier Tage dem Rotteprodukt eine Produktbezeichnung zu. Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die aerob heterotrophen Zellen elementaren Sauerstoff zur Oxidation der Nährstoffe benötigen. Je stabiler der Kompost, desto geringer die mikrobiologische Aktivität und die umgesetzte Sauerstoffmenge.

Beide untersuchten Kompostansätze erreichten den Rottegrad V und bekommen damit die Produktbezeichnung „Fertigkompost“. Dieses Ergebnis wird durch die mikrobiologischen Untersuchungen bestätigt. Über den Kompostierungszeitraum konnte eine Reduzierung der Keimzahl um $\log 10^3$ nachgewiesen werden, welches den Zielwerten für die mikrobiologische Qualität der WHO-Richtlinien (WHO 2006) entspricht.

Anhand der untersuchten Qualitätsparameter ist die stoffliche Verwertung des Klärschlammkompostes in keiner Weise eingeschränkt. Für die Kompostierung wird jedoch aufgrund der Nährstoffgehalte und Düngewirkung Rindenmulch als Strukturmaterial empfohlen.

Ebenso wie ARNOLD (2010) kann die Ausbringung des Kompostes auf Obstplantagen empfohlen werden. Insbesondere auf den alluvialen Böden alter Obstplantagen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt und dichter Bodenstruktur kann die Ausbringung des Klärschlammkompostes die Bodeneigenschaften verbessern (SHIBISTOVA et al. 2009). Auch der Einsatz im Getreideanbau und als Blumendünger ist denkbar. Nicht zu vergessen ist allerdings, die damit notwendige Wissensbildung bei den Landwirten und Obstbauern, die von den Vorteilen des Klärschlammkompostes überzeugt werden müssen, da eine Ausbringung arbeitsintensiver sein kann als die Anwendung von Mineraldüngern (ARNOLD 2010, WIENEKE 2005).

5.1.2 Wurmkompostierung

Weltweit zählen Regenwürmer zu den wichtigsten Organismen für ertragreiche Böden eines nachhaltigen Agrarökosystems, weshalb die professionelle Kultivierung von Regenwürmern, eine lange Tradition hat. In Asien sind vor allem die Hauskompostierung in Batch-Containern sowie die technische „industrielle“ Wurmkompostierung in Beeten oder Mieten verbreitet (ARNOLD 2010).

Im Mekong Delta zählt die Wurmkompostierung nicht zur gängigen Praxis, auch wenn bei durchgeführten Befragungen sieben praktizierende Landwirte in der Region Can Tho gefunden wurden (LE HUNG 2003, ARNOLD 2010). Ein Grund für den Einsatz der Behandlungsmethode ist laut den befragten Landwirten der Verkauf der produzierten Würmer, *Eisenia fetida* oder *Perionyx excavatus* (ARNOLD 2010).

Als Motivation eine Wurmkompostierung zu starten, nannten andere Befragte an erster Stelle die Rentabilität durch die Vermarktung des Wurmkompostes. Anreize waren ebenfalls die einfache Handhabung und die Verringerung der krankheitserregenden Keime (WIENEKE 2005).

Als In- und Outputströme der Stoffbilanz lassen sich für die Wurmkompostierungsversuche in der Industriezone Tra Noc folgende Systemgrößen (Tabelle 5-5) festlegen:

Tabelle 5-5: Systemgrößen der Wurmkompostierung

Input	Output	Bilanzraum
Klärschlamm	Verdunstung*	Wurmkompost
Kompostwürmer	Gasemissionen (C und N)*	
	Aufnahme von Nährstoffen durch Kompostwürmer; Vermehrung der Würmer*	

* Fehlbetrag der Massenbilanz

Eine Nährstoff- und Schwermetallanalyse der Kompostwürmer war in der Industriezone Tra Noc nicht durchzuführen, so dass für die Aufnahme der Kompostwürmer kein eigenes Datenmaterial zur Verfügung stand. Erfahrungen anderer Autoren zur Nährstoffaufnahme und Schwermetallakkumulation der Kompostwürmer werden nachfolgend diskutiert. Abbildung 5-6 zeigt die erstellte Stoffbilanz für die durchgeführten Wurmkompostierungsversuche mit dem Klärschlamm der Fischverarbeitung.

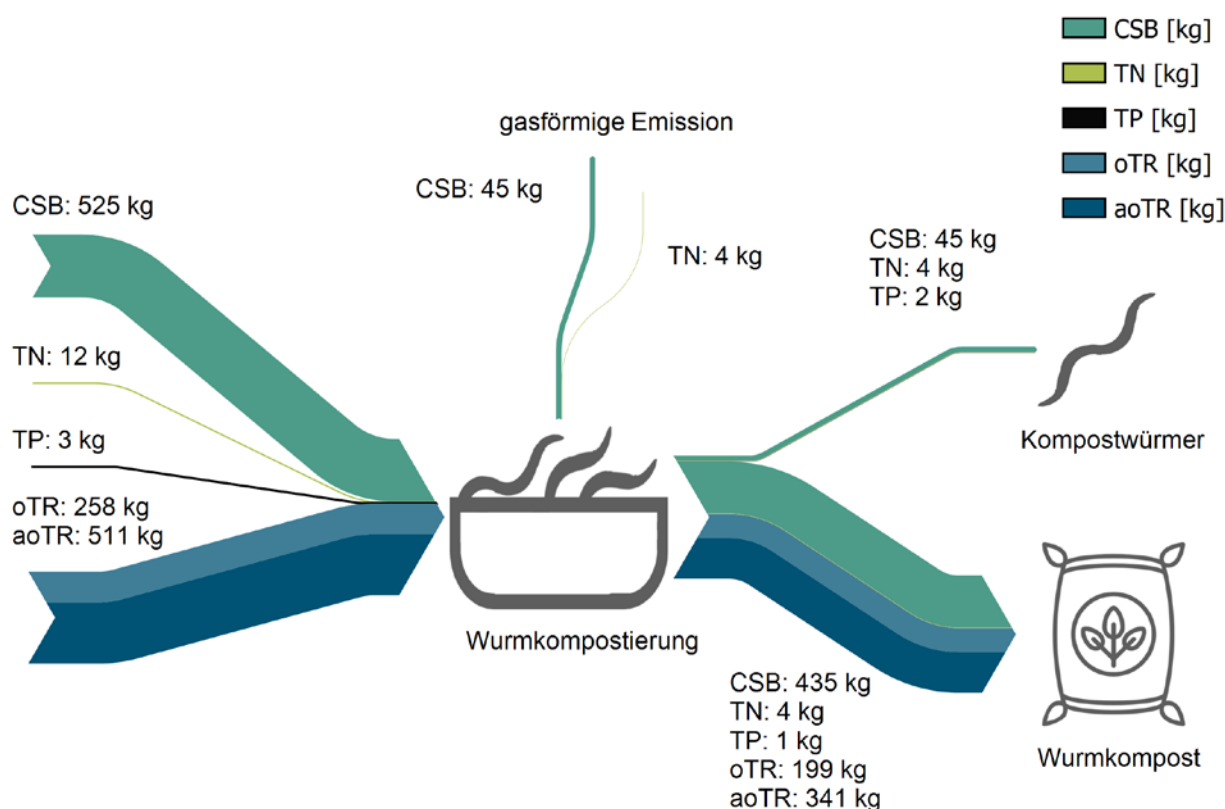


Abbildung 5-6: Stoffstrombilanz der Wurmkompostierung

Als Annahme für die Aufstellung der Stoffbilanz wurden 50 % des Fehlbetrages der Aufnahme der Kompostwürmer (TP-Fehlbetrag 100 % Aufnahme Kompostwürmer) und 50 % der gasförmigen Emission zugeordnet.

Zur Durchführung einer Wurmkompostierung benötigen die Kompostwürmer besondere Bedingungen. Erst wenn diese erfüllt sind, kann der Prozess der Wurmkompostierung erfolgreich ablaufen. In Tabelle 5-6 sind die Parameter für einen optimalen Prozessablauf zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5-6: Optimale Bedingungen und Einflussfaktoren für die Wurmaufzucht

Parameter	<i>Eisenia fetida</i>	<i>Perionyx excavatus</i>	Beschreibung
Temperatur	20-30°C	9-30°C	Die Temperatur steigt nicht über 30°C (mesophile Kompostierung), es findet keine Selbsterhitzung statt. Höchste Abbau- und Reproduktionsraten bei gemäßigten Temperaturen (20-30°C).
Wassergehalt	80-90 %	70-90 %	Verhindert eine Dehydration der Regenwürmer und fördert zusätzlich die mikrobielle Aktivität. Eine vorherige Entwässerung des Klärschlammes ist zwingend erforderlich.
pH-Wert	7-8	5-9	Kompostwürmer reagieren sensibel auf pH-Wert-Änderungen. Zudem kommt es im neutralen Bereich zu geringeren gasförmigen N-Emissionen.
Salzgehalt	<0,5 %	<0,5 %	Die Würmer reagieren sensibel auf zu hohe Salzgehalte, vor allem in Kombination mit Schwermetallen.
Nährstoffe			Ideal für eine schnelle Kompostierung ist ein C/N-Verhältnis von 25. Calcium ist wichtig für die Sekretbildung der Kompostwürmer und fördert die biologische Aktivität.

Quelle: RIVERO-HERNANDEZ (1991), ARNOLD (2010), SINHA et al. (2011)

Temperatur und pH-Wert

Die Temperatur in den genutzten Kompostboxen wurde während des Versuchszeitraums täglich gemessen und lag in allen Ansätzen zwischen 26-33°C, und damit unterhalb der vorherrschenden Umgebungstemperatur. Eine Austrocknung des Materials während der Kompostierung konnte aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit ausgeschlossen werden, so dass keine zusätzliche Befeuchtung der Ansätze notwendig war und die Temperaturen im Optimalbereich der Kompostwürmer lagen.

Der pH-Wert stieg in der ersten Versuchswoche leicht an und fiel dann stetig ab. Die Wurmkompostierungsversuche von ARNOLD (2010), GARG et al. (2006), YANG et al. (2014) und HEMALATHA (2012) bestätigen eine Verringerung des pH-Wertes über den Versuchszeitraum. Die pH-Wert-Verringerung tritt aufgrund der Mineralisierung von Stickstoff und Phosphor zu Nitrit/Nitrat und Phosphat sowie durch die Umwandlung der

organischen Substanz zu organischen Säuren auf (GARG et al. 2006, ARNOLD 2010, YANG et al. 2014, SANGWAN et al. 2008). Die gegenläufige Erhöhung der Leitfähigkeit, die in dem Wurmkompost gemessen wurde, wird ebenfalls von GARG et al. (2006) berichtet. Der Autor bringt dies in Verbindung mit den frei verfügbaren Ionen und Mineralien, die sich durch die Nahrungsaufnahme und Ausscheidungen der Kompostwürmer ergeben.

Abbildung 5-7 zeigt die Verläufe des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit für den Wurmkompost der Fischverarbeitung über den Versuchszeitraum.

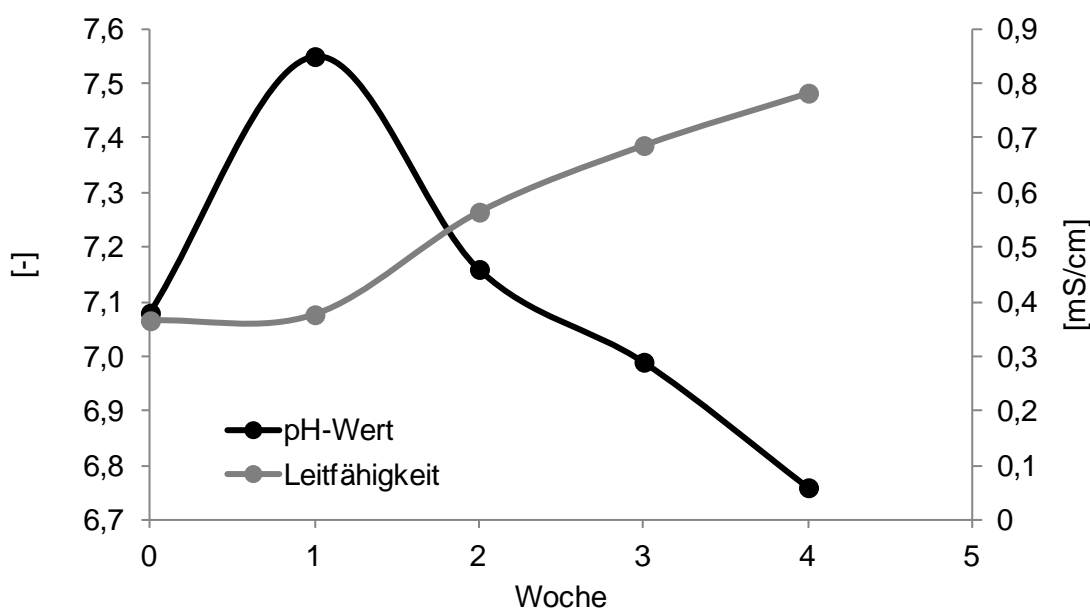


Abbildung 5-7: Verlauf des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit

Nährstoffe

Das C/N-Verhältnis lag zu Beginn der Wurmkompostierung bei 17 und damit unter dem empfohlenen Wert von 25. Auswirkungen dieses C/N-Verhältnisses auf den Kompostierungsprozess waren demnach starke N-Austräge aus dem Bilanzraum (NDEGWA & THOMPSON 2000). Einerseits durch die erhöhte Ausstrippung von NH_3 aufgrund der Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Verhältnisses (siehe Kapitel 5.1.1). Durch die Zugabe von Strukturmaterialien kann ein ausgeglichenes Nährstoffverhältnis im Wurmkompost geschaffen (DOMÍNGUEZ et al. 2000) und damit die NH_3 -Volatilisation reduziert werden. Hinsichtlich der Zugabe von Strukturmaterial zur Wurmkompostierung besteht für die Industriezone Tra Noc weiterer Forschungsbedarf.

Andererseits sank die Ammoniumkonzentration über den Kompostierungszeitraum ab und die Nitratgehalte stiegen an, ein Indiz für Nitrifikations- und Mineralisationsprozesse der organischen Substanz im Wurmkompost. Organisch vorliegender Stickstoff wird zu NH_4 zersetzt und zu NO_3 umgewandelt (YANG et al. 2014). Durch die Aktivität der Kompostwürmer entstehen aerobe Zonen, die eine vermehrte Nitrifikation bewirken (YANG et

al. 2014). Im frischen Kompostmaterial hingegen ist der Sauerstoffeintrag gering, da die Kompostwürmer das Material noch nicht ausreichend bearbeitet haben. Es existieren mehr anaerobe Zonen. Dieses anaerobe Milieu führt zu Denitrifikationsprozessen, die Stickstoff als gasförmige Emission aus dem Bilanzraum austragen (BORAH et al. 2007). ARNOLD (2010) führt zusätzlich die Aufnahmen der Kompostwürmer als einen N-Outputpfad an, der nach ihren Untersuchungen den größten Anteil einnimmt.

Andere Autoren (GARG et al. 2006, DEL AGUILA JUAREZ, PEDRO et al. 2011) berichten von einer Erhöhung des TN-Gehaltes am Ende des Kompostierungsprozesses, die in den eigenen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden konnte. Als Gründe für den Stickstoffanstieg werden die Mineralisation der organischen Substanz, die Absonderung von stickstoffhaltigem Schleim sowie die Stoffwechselprodukte der Kompostwürmer genannt.

Der Kohlenstoffgehalt reduziert sich über den Versuchszeitraum um 17 %. Folgende Prozesse führen GARG et al. (2006) für die C-Abnahme an: Transformation zu CO₂ durch den aeroben Abbau, Aufnahme von organischem Kohlenstoff durch die Kompostwürmer und Abbau der organischen Fraktion (oTR-Reduktion um 23 %). Außerdem werden die TP-Gehalte um 77 % reduziert. Da bei Phosphor kein gasförmiger Verlust aus dem Bilanzraum möglich ist und ein Austrag über den Sickerwasserpfad aufgrund der geschlossenen Rotteboxen auszuschließen ist, verbleibt der Outputpfad über die Aufnahme durch die Kompostwürmer. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen der Wurmkompostierungsuntersuchungen von ARNOLD (2010). GARG et al. (2006), SANGWAN et al. (2008), GUPTA & GARG (2008) und NDEGWA & THOMPSON (2000) hingegen ermittelten einen Anstieg der TP-Gehalte im fertigen Wurmkompost. Der Anstieg der TP-Gehalte konnte auch bei eigenen Untersuchungen in der Industriezone Tra Noc mit anderen Substraten nachgewiesen werden.

Nicht ungewöhnlich ist der Anstieg der Nährstoffe Ca, K und Mg, wie er im untersuchten Wurmkompost gemessen wurde, denn die mikrobielle Flora beeinflusst die Verfügbarkeit der Nährstoffe. GARG et al. (2006) und KHWAIRAKPAM & BHARGAVA (2009) nennen die Produktion von Säuren durch die Mikroorganismen als primären Mechanismus für den Aufschluss von unlöslichen Nährstoffen und die Erhöhung von Kalium im Wurmkompost. Ein Anstieg der Calciumkonzentration ist ebenso von KHWAIRAKPAM & BHARGAVA (2009) und SHAK et al. (2014) festgestellt worden. Zurückzuführen ist der Ca-Anstieg laut den Autoren auf den Calciumstoffwechsel im Kompostwurmdarm, der den Auswurf von anorganischem Calcium und Magnesium erhöht. Abbildung 5-8 stellt die Anfangs- und Endgehalte der Nährstoffe im untersuchten Wurmkompost dar.

Die Konzentrationen der Schwermetalle Chrom, Kupfer und Zink stiegen ebenfalls während des Kompostierungszeitraums an. Diese Ergebnisse werden von GUPTA & GARG (2008), ELVIRA & SAMPEDRO (1998) und DEOLALIKAR et al. (2005) gestützt. Die Autoren führen den Anstieg der Schwermetallgehalte auf den Mineralisierungsprozess zurück,

den die Kompostwürmer durch den Abbau und die Stabilisierung von Klärschlamm beschleunigen. Zudem wird die Gewichts- und Volumenreduktion durch den Zersetzungsprozess der organischen Substanz als Grund für die Zunahme der Schwermetallkonzentrationen angeführt. Die Schwermetallgehalte liegen mit 35-56 mg/kg unterhalb der Grenzwerte der BIOABFV (1998) und ermöglichen damit die stoffliche Verwertung.

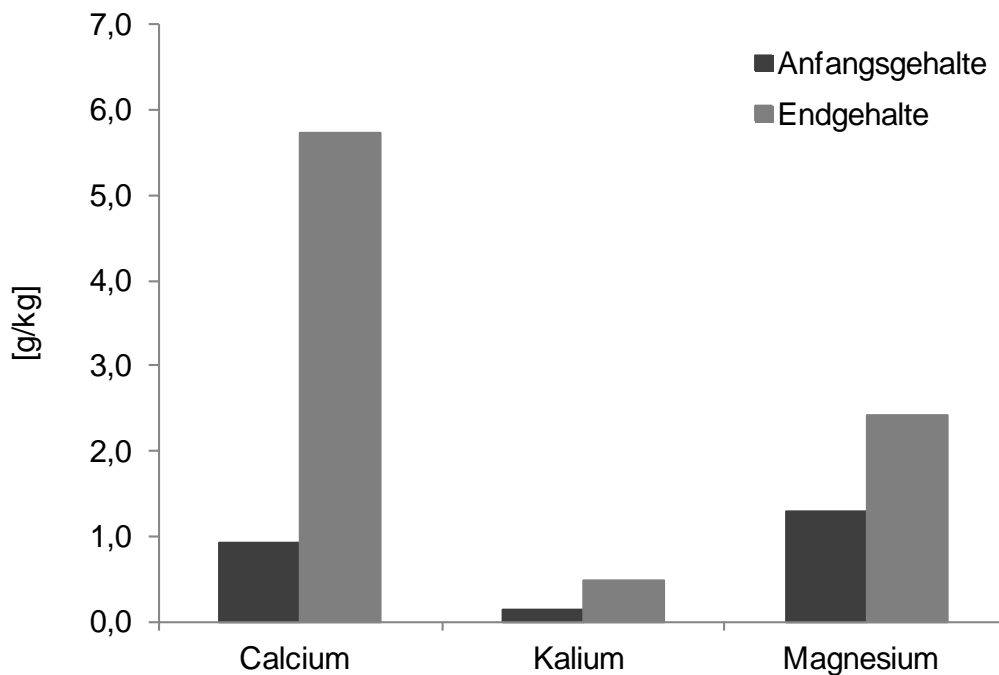


Abbildung 5-8: Anfangs- und Endgehalte der Nährstoffe im Wurmkompost

Gleiches gilt für die mikrobiologischen Untersuchungen, bei denen die Anzahl *E. coli*-Bakterien im Wurmkompost unter der Nachweisgrenze lag. Die Lagerzeit und die Inaktivierung der Bakterien durch die Stoffwechselprozesse der Kompostwürmer sind als Ursache für die niedrige Keimzahl trotz fehlender Selbsterhitzung anzusehen (ARNOLD 2010).

Die Ergebnisse zeigen, dass aus Klärschlamm ein wertvoller organischer Dünger hergestellt werden kann. Der Wurmkompost hatte am Versuchsende eine gute krümelige Struktur ohne störenden Geruch, die Masse konnte über den Kompostierungszeitraum um 63 % reduziert werden. Eine Massenreduktion um 20-50 % konnten auch RENSINK & RULKENS (1997) und RULKENS et al. (1998) bei ihren Untersuchungen feststellen, die die Kompostwürmer zur Reduzierung von Überschussschlamm auf niederländischen Kläranlagen einsetzten. Zudem verringerten sich die TR- und oTR-Gehalte bei der Wurmkompostierung über den Versuchszeitraum. Die signifikante Reduktion des TR-Gehaltes wird auch von NDEGWA et al. (2000) bestätigt, der diese Abnahme in Verbindung mit der Reduzierung der Regenwurmdichte setzt.

Als Verwertungsweg wird in Vietnam vermehrt die Düngung von Baumschulen, die Bonsai Kultivierung und der Blumenanbau genutzt, dies nicht zuletzt wegen der geringen Produktionsmenge, die einen Einsatz in der Landwirtschaft aufgrund der hohen Nährstoffnachfrage erschwert (ARNOLD 2010).

Eine Trennung bzw. spezielle Siebung des Wurmkompostes nach Beendigung des Kompostierungsprozesses ist nicht notwendig. *Eisenia fetida* verlässt den „durchgearbeiteten“ Kompost von selbst, so dass bei einer gut geplanten Kompostierungsanlage die Kompostwürmer ins frische Material wandern und der fertige Wurmkompost nahezu wurmfrei ist.

Neben dem Wurmkompost besteht die Möglichkeit die eingesetzten Kompostwürmer weiter zu verwenden. ARNOLD (2010) und EDWARDS & BATER (1992) beschreiben die Bodenverbesserung und Rekultivierung von dicht gelagerten Böden, wie sie im Mekong Delta häufig zu finden sind. Auch der Einsatz als Tierfutter in der Aquakultur oder zur Aufzucht von Schildkröten wird in Vietnam praktiziert. Das Gewebe des Kompostwurmes erweist sich aufgrund des hohen Proteingehaltes (60-70 %), der essentiellen Aminosäuren und der langkettigen Fettsäuren als hervorragendes Nahrungsergänzungsmittel für Hühner, Schweine und andere Haustiere (EDWARDS & ARANCON o. J.).

5.1.3 Trockenbeete und die Klärschlammvererdung

Bis in die 70er Jahre waren Trockenbeete die primäre Methode zur Entwässerung von Klärschlamm (NOVAK 2001). Mit der Weiterentwicklung der Klärschlammbehandlung sind heute viele Verfahren für die Entwässerung verfügbar. Eine Entwässerung ist mit maschinellen Anlagen fast problemlos möglich, allerdings ist ein hoher Aufwand an Energie, Hilfs- und Zuschlagstoffen sowie Wartung erforderlich (GÖDECKE 2004). Diese Kriterien führten zum Ausschluss der maschinellen Entwässerung als Behandlungstechnologie für das nachhaltige Klärschlammkonzept und zur näheren Betrachtung der natürlichen Schlammentwässerungsverfahren. Die natürlichen Entwässerungsverfahren nutzen überwiegend die Schwerkraft und Sonnenenergie, benötigen wenig Energie und verzichten auf die Verwendung von Zuschlags- und Hilfsstoffen (GÖDECKE 2004).

Trockenbeete kommen in Vietnam sowohl für die Entwässerung kommunaler Klärschlämme als auch für die Behandlung von Fäkalschlamm zum Einsatz (WORLDBANK 2013). Zumeist haben die Kläranlagen in Vietnam jedoch keine Schlammentwässerung (VIET et al. 2013).

Schilf ist eine einheimische wilde Pflanze, die in vielen Provinzen Vietnams zu finden ist (PHA et al. 2014). Bevorzugt wächst die Pionierpflanze Schilf an wasserreichen Standorten mit hoher Bodenfeuchte (RODEWALD-RUDESCU 1974), weshalb sie im Mekong Delta weit verbreitet ist und als geeignet für die Vererdungsversuche in der Industriezone Tra Noc eingestuft wurde. Die Vererdungsbeete benötigen für die Pflanzen ausreichend

Niederschlag, da Schilfrohr ein starkes Wasserbedürfnis hat. Die jährlichen Niederschlagsmengen können diesen Wasserbedarf oftmals nicht annähernd decken (RODEWALD-RUDESCU 1974), weshalb bei den Versuchsreihen auf eine Überdachung verzichtet wurde. Klärschlammvererdungsanlagen existieren in Vietnam bis jetzt nur im Rahmen von Forschungsprojekten im Labor- und Pilotmaßstab.

Die ähnliche Verfahrensweise bei Trockenbeeten und der Klärschlammvererdung führt zur gemeinsamen Betrachtung hinsichtlich der Stoffbilanzen und der Qualität der Endprodukte. Nachfolgend sind die In- und Outputpfade der Stoffbilanzen dargestellt (Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Systemgrößen der Trocken- und Vererdungsbeete

	Input	Output	Bilanzraum
Trockenbeete	Klärschlamm	Verdunstung*	Schlammboden
		Gasemissionen (C und N)*	Filterkörper**
		Sickerwasser	
Vererdungsbeete	Klärschlamm	Evapotranspiration*	Schlammboden
	Nasse Deposition	Gasemissionen (C und N)*	Filterkörper**
	Trockene Deposition**	Sickerwasser	
		Pflanzen**	

* Fehlbetrag der Massenbilanz

** Annahme

Über den Versuchszeitraum wurden 24,7 mm Niederschlag ($0,59 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) gemessen, dass sind in etwa 5 % der eingebrachten Wassermenge über den Klärschlamm. Wird jedoch bedacht, dass der Untersuchungszeitraum nur 6 Wochen umfasste und die jährliche Niederschlagsmenge im Mittel bei 1.650 mm (GARSCHAGEN et al. 2012) liegt, sind durchschnittlich über das Jahr gesehen mit $4,52 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ zu rechnen. Der Anteil der durch den Niederschlag zugeführten Wassermenge liegt demnach bei >35 %. Für eine Anlagenauslegung in Vietnam ist infolgedessen die jährliche nasse Deposition besonders zu beachten.

Zusätzlich zum Niederschlag kann über die Deposition Stickstoff in den Bilanzraum eingetragen werden. PHONG et al. (2011) untersuchten im Mekong Delta den Nährstoffhaushalt von Reisfeldern und konnten eine Deposition von $1,5 \text{ kg N}/(\text{ha} \cdot \text{a})$, $0,25 \text{ kg P}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ und $8 \text{ kg K}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ nachweisen. Ein Mehreintrag in die Vererdungsbeete über die Deposition läge damit im Jahr bei $<0,1 \text{ kg}$ für die drei genannten Nährstoffe. Dieser geringe Eintrag kann über den Bilanzierungszeitraum vernachlässigt werden.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die Stoffbilanzen der Schilf- und Trockenbeete der Fischverarbeitung dar.

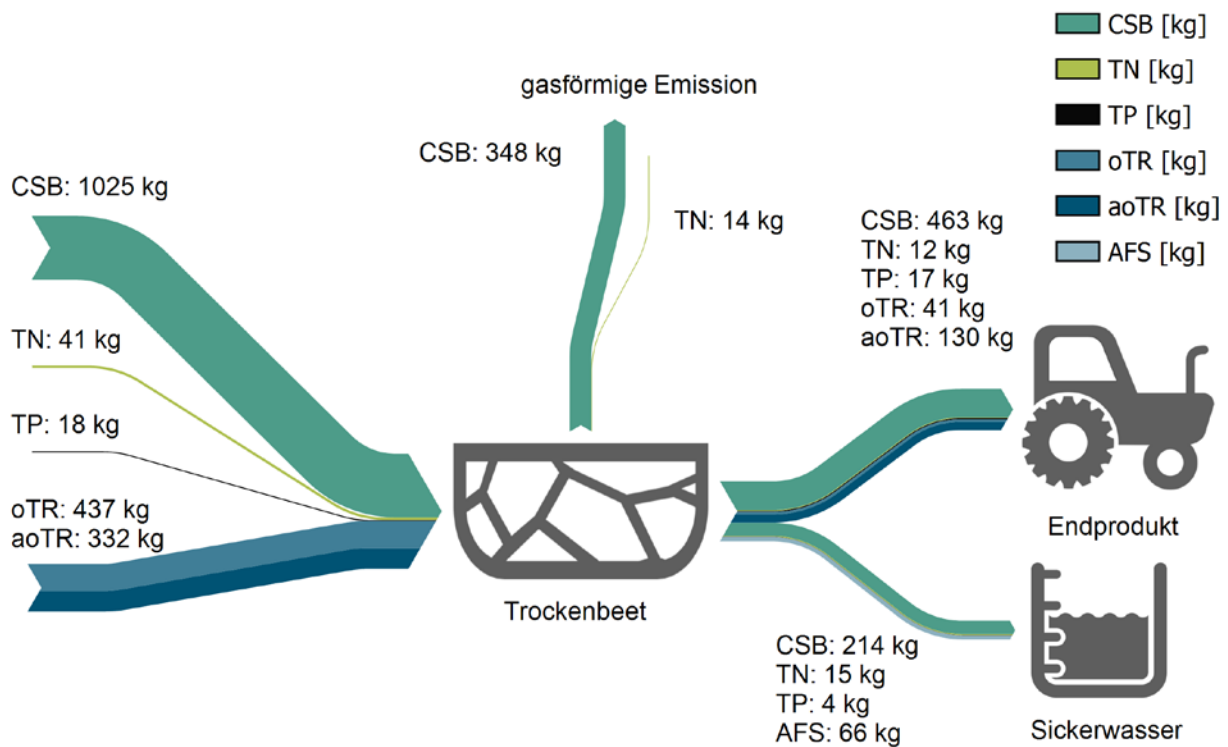


Abbildung 5-9: Stoffstrombilanz der Trockenbeete

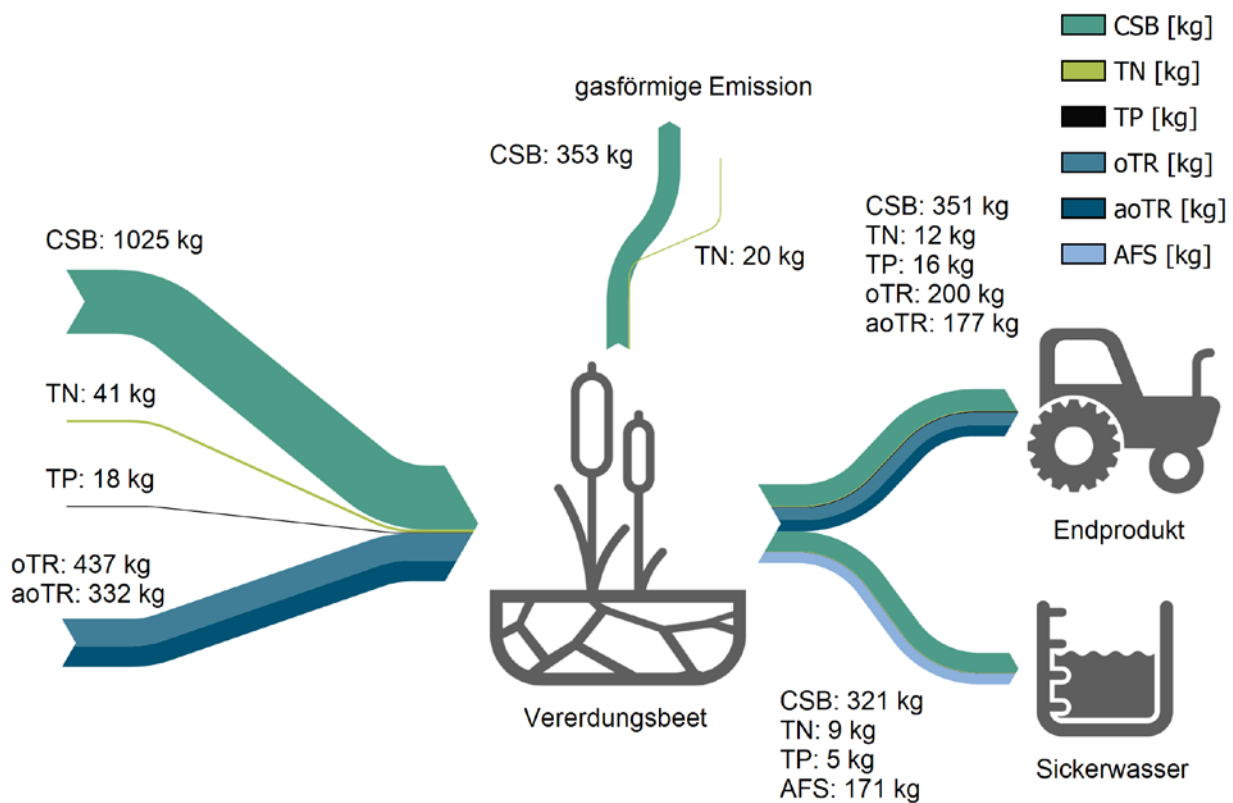


Abbildung 5-10: Stoffstrombilanz der Vererdungsbeete

Da die Trocken- und Vererdungsbeete zu den natürlichen Verfahren zählen, die Gravitation und Schwerkraft für die Entwässerung nutzen, spielen vor allem Beschickungsmenge und -intensität sowie bei der Klärschlammvererdung die Vitalität des Schilfbestandes eine entscheidende Rolle (Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Einflussfaktoren der Trockenbeete und Klärschlammvererdung

Parameter	Trockenbeet	Klärschlammvererdung	Beschreibung
<i>Beschickungsmenge</i>	20-30 cm Schichthöhe	bis 250 kg/(m ² *a)	Ausschlaggebend für eine gute Entwässerungsleistung der Trockenbeete ist die Schichthöhe. Die Beschickungsmenge der Vererdungsbeete hängt von der Klärschlammqualität ab.
<i>Beschickungsintensität</i>	Batchzyklus	1-2 wöchiges Intervall	Beschickungsintensität und -intervalle sind abhängig von Klima und Lage der Beete.
<i>Schilfbestand</i>			Für die Vererdung ist Schilf der zentrale Prozessfaktor, der zu bodenbildenden Prozessen, Schlammbelüftung und -entwässerung sowie Schaffung günstiger Lebensbedingungen für die Mikroflora führt.

Quelle: AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (2004), HEINSS & MONTANGERO (2003), WANG et al. (2007a), NIELSEN (2011), PAULY & BLAU (1997)

Für die Beurteilung der Entwässerungsleistung und Ermittlung der Rückbelastung ist die Wasserbilanz der Beete zu betrachten. Über den Sickerwasserpfad wurden bei dem Trockenbeet 87 % der zugeführten Wassermenge aus dem System ausgetragen, wohingegen beim Vererdungsbeete lediglich 63 % der Kläranlage zugeführt werden mussten. HOFMANN (1992) und REINHOFER (1998) fanden in Vererdungsbeeten eine Entwässerungsleistung bei aerob stabilisiertem Schlamm von >65 %.

Der Schlamm Boden der beiden Beete wies am Ende der Versuchsreihen einen TR von 2,8 % (unbepflanzt) und 9,4 % (bepflanzt) auf. Diese TR-Werte liegen unter denen von anderen Autoren erreichten TR-Werte von 10-37,5 % (NIELSEN 2011, PAULY & BLAU 1997). Beide Autoren untersuchten Anlagen in Europa mit geringerer Beschickungsintensität als für Vietnam aufgrund der klimatischen Rahmenbedingungen (zweimal wöchentlich) bei den Versuchen gewählt wurde. NIELSEN (2011) empfiehlt für ein Gleichgewicht zwischen Beschickung und Ruhephase mindestens 8 Beete, um die Entwässerungsleistung und Mineralisierung nicht durch zu häufige Beschickungen einzuschränken. Für die Umsetzung in Vietnam ist demnach in der Inbetriebnahmephase mit geringeren Beschickungsintensitäten zu starten und diese je nach Klima (Trocken- oder Regenzeit) langsam anzupassen. Eine gute Durchlässigkeit des Bodenfilters ist

Voraussetzung für den Ablauf des Sickerwassers und förderlich für die Entwässerungsleistung.

Im Versuchszeitraum sind aus dem Trockenbeet 0,24 mm/d verdunstet, während das Vererdungsbeete eine Verdunstungsleistung von 1,06 mm/d vorwies. In einem natürlich und dicht bewachsenen Schilfbestand konnte RODEWALD-RUDESCU (1974) 3,6-4,1 mm/d messen. REINHOFER (1998) und HOFMANN (1992) geben für ihre Klärschlammvererdung Verdunstungsleistungen von 1,4-1,6 mm/d an. Die höhere Verdunstungsleistung des Vererdungsbeetes ist auf die zusätzliche Transpiration der Pflanzen zurückzuführen. In Trockenzeiten ist regelmäßig mit einer höheren Verdunstung als zur Regenzeit zu rechnen, so dass die Beschickungsintensität in diesen Monaten im Hinblick auf die Pflanzenvitalität in den Vererdungsbeeten erhöht werden sollte. Alternativ können die Schilfpflanzen bewässert werden.

Die Entwässerungsleistung beider Beete ist in Anbetracht der klimatischen Randbedingungen zu gering, ebenso im Vergleich zur maschinellen Entwässerung. Ein längerer Versuchszeitraum als die gewählten 6 Wochen, der vor allem den Schilfpflanzen Zeit zur Adaption gibt und sowohl Regen- als auch Trockenzeit einbezieht, ist zur besseren Aussagekraft über die Entwässerungsleistung zu empfehlen.

Die Feststoffbilanz kann aufgrund der biologischen Umsetzungsprozesse nicht geschlossen werden. Über den Fehlbetrag ist es möglich Rückschlüsse auf den Abbau der organischen Substanz zu schließen. Prozentual wurde im Trockenbeet die organische Substanz zu 91 % abgebaut; im Vererdungsbeet hingegen zu 54 %, die den Fehlbetrag der Feststoffmasse übersteigen. Wird in die Betrachtung der Glühverlust (GV) hinzugezogen, der im Vererdungsbeet bei 49 % lag, weist dieser damit einen voll stabilisierten Zustand auf. Bei mehrjährigen Anlagen kann mit einem GV von 40-45 % gerechnet werden (PAULY & BLAU 1997, REINHOFER 1998, OBARSKA-PEMPKOWIAK & TUSZYNSKA 2003).

Die Beschickungsmenge lag für beide Beete bei 53 kg/(m²*a). Laut Heinss & Montangero (2003) kann unter tropischem Klima eine Feststoffbelastung von 250 kg/(m²*a) in Vererdungsbeeten erreicht werden, die allerdings in drei Phasen und mit Fäkalschlamm umgesetzt worden ist. In Anbetracht des kurzen Versuchszeitraums ist davon auszugehen, dass eine phasenweise Erhöhung der Feststoffbelastung auch in Vietnam ohne Probleme möglich ist. Dies allerdings immer unter Vorbehalt eines vitalen Schilfbestandes. Während des Versuchszeitraums konnte keine Beeinträchtigung des Schilfbestandes festgestellt werden (siehe Abbildung 5-11).

Für die Trockenbeete ist die Schichthöhe bei der Beschickung zu betrachten (WANG et al. 2007b). Aufgrund der identischen Durchführung der Beschickung für beide Versuchsbeete sind hinsichtlich der Trockenbeete spezielle Versuche im Batchbetrieb unter Betrachtung der Schichthöhen und Trocknungszeit durchzuführen. Unter den klimati-

schen Verhältnissen wird vorerst bei guter Durchlässigkeit des Filterkörpers von einer Realisierung mächtigerer Schichthöhe ausgegangen.

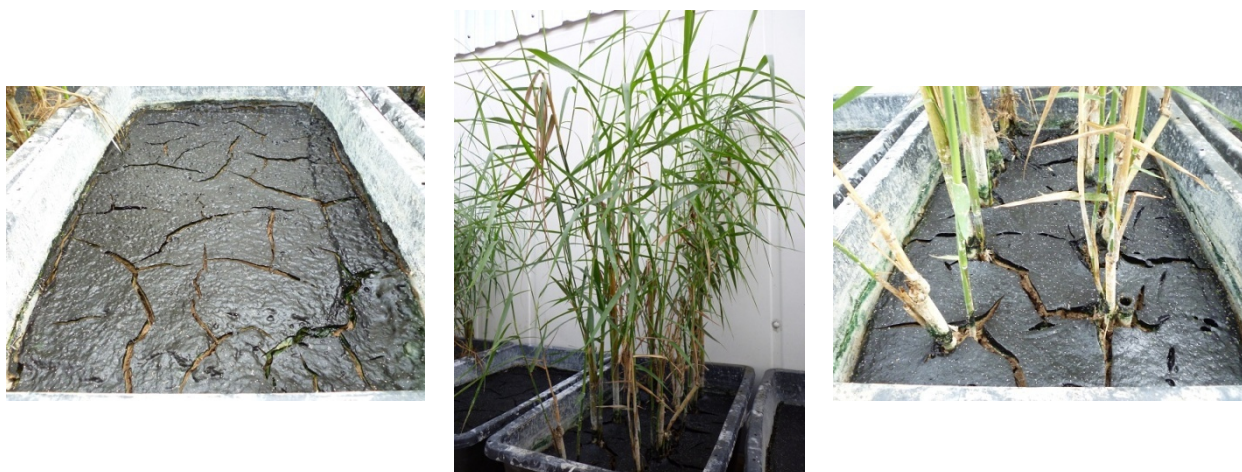


Abbildung 5-11: Austrocknung und Pflanzenbestand der Trocken- und Vererdungsbeete

Für die N-Bilanz sind lediglich die Klärschlammzugabe, der Sickerwasserpfad und die gasförmige Emission sowie die im Schlamm Boden gespeicherte Masse relevant. Die Pflanzenaufnahme von Nährstoffen konnte von KOOTTATEP et al. (2004a) als gering nachgewiesen werden und kann deshalb in der Stickstoffbilanz vernachlässigt werden. DRÜCKER (2009) vernachlässigt für ihre theoretischen Bilanzen zusätzlich den Filterkörper und interpretiert den Fehlbetrag von 82 % (HEINSS & MONTANGERO 2003) als Stickstoffaustrag in die Atmosphäre. Diese hohen Emissionen können bei den Versuchen in der Industriezone Tra Noc nicht erreicht werden. Bei den Vererdungsbeeten wird eine gasförmige N-Emission von 49 % erreicht, während die Trockenbeete 34 % erreichten. Die mosaikartige Verteilung von aeroben und anoxischen Teilbereichen (Abbildung 5-11), führt zu einer Denitrifikation in den Beeten. Durch den Sauerstoffeintrag über die Wurzeln wird die Nitrifikation gefördert, welches die geringen Ammoniumgehalte im Schlamm Boden des Vererdungsbeetes verdeutlichen. Ein zusätzlicher Austrag kann über die Verflüchtigung von Ammoniak erreicht werden.

Analog zur N-Bilanz sind bei der Bilanzierung von Phosphor die gleichen In- und Outputpfade zu berücksichtigen. Der Hauptteil des eingetragenen Phosphors verbleibt im Schlamm Boden, was die Ergebnisse der Versuche mit 88 % im Trockenbeet und 85 % im Vererdungsbeet verdeutlichen. Bestätigt wird dieser hohe P-Gehalt im Schlamm Boden von JORDAN (2006), LIÉNARD & DUCHÈNE (1995) und PABSCH (2004). Der Mehreintrag an Phosphor ist mit der geringen trockenen Deposition zu erklären (PHONG et al. 2011) sowie laut AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (2004) auf einen ständigen Wechsel zwischen Festlegung und Rücklösungsvorgängen in den Beeten.

Die Schwermetalluntersuchungen des Schlamm Bodens haben gezeigt, dass die Grenzwerte zur landwirtschaftlichen Verwertung (siehe Tabelle 2-12) nach dem kurzen Versuchszeitraum eingehalten werden können. Allerdings stellen REINHOFER (1998) und

SCHOLL et al. (1985) eine Anreicherung von Schwermetallen im Schlamm Boden fest, die REINHOFER (1998) mit der Abnahme der Trockensubstanz und der Festlegung der Schwermetalle im Vererdungsbeet erklärt. Für den Langzeitbetrieb von Vererdungsbeeten sind deshalb die Schwermetallkonzentrationen regelmäßig zu kontrollieren, damit vor der Beeträumung eine geeignete Verwertungsmöglichkeit gefunden werden kann.

Einkeimblättrigen Pflanzen, wie die Schilfpflanze, hilft der essentielle Nährstoff Calcium beim Wachstum, insbesondere beim Wurzelwachstum. Dies erscheint gerade in der Anfangsphase der Vererdungsbeete notwendig zu sein, weshalb verglichen mit anderen Autoren der Calciumgehalt vom Vererdungsbeet 14,5 g/kg TR geringer ist (REINHOFER 1998, SCHOLL et al. 1985). Im Trockenbeet liegt er bei 10,9 g/kg TR.

Die Kaliumwerte liegen mit 4,83 g/kg TR (Trockenbeet) und 2,74 g/kg TR (Vererdungsbeet) in dem Bereich von REINHOFER (1998) und PABSCH (2004). Zu beachten ist hier, dass die Pflanzen im Vergleich zum Trockenbeet mehr Kalium aufgenommen haben. Die Pflanze nimmt Magnesium in geringeren Mengen auf als Calcium und Kalium (MENGEL 1991), weshalb die Magnesiumgehalte von Trocken- und Vererdungsbeet beide etwa 6,3 g/kg TR aufweisen und damit im Bereich von REINHOFER (1998) liegen. Die nachfolgende Tabelle bewertet die Schlamm Böden hinsichtlich der Düngewirkung.

Tabelle 5-9: Bewertung der Nährstoffgehalte im Klärschlamm hinsichtlich Düngewirkung

Gehaltsbereiche [%TS]	niedrig	Mittel	hoch	Trockenbeet	Vererdungsbeet
K_2O	0-0,5	>0,5-1,0	>1,0	mittel	niedrig
CaO	0-3,0	>3,0-8,0	>8,0	niedrig	niedrig
Mg	0-0,5	>0,5-1,0	>1,0	hoch	mittel

Quelle: PABSCH (2004)

Hier wird ersichtlich, dass die Gehalte im Vererdungsbeet aufgrund des höheren TR-Gehaltes bei der Düngewirkung schlechter bewertet werden als die Trockenbeete. Eine Untersuchung der Schlamm Böden hinsichtlich der Pflanzenverfügbarkeit der vorliegenden Nährstoffe ist empfehlenswert.

Hinsichtlich der mikrobiologischen Untersuchungen ist im Schlamm Boden des Vererdungsbeetes ein geringerer Gehalt an koloniebildenden Einheiten zu finden (Vererdungsbeet 10^3 ; Trockenbeet 10^4). Diese Ergebnisse werden von REINHOFER (1998), PABSCH (2004), SCHOLL et al. (1985) und ZACHER et al. (1987) unterstützt und als seuchenhygienisch unbedenklich eingestuft.

5.1.4 Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Die Energieversorgung in Vietnam kann nicht mit dem Wirtschaftswachstum des Landes mithalten, so dass es zu häufigen Stromausfällen sowohl in Städten als auch in den ländlichen Regionen kommt. Im verabschiedeten Masterplan der Regierung ist vorgesehen künftig die erneuerbaren Energieträger verstärkt zu fördern (Entscheidung des Premierministers 1208/QD-TTG, 21. Juli 2011) und ihren Anteil auf 5,6 Prozent zu steigern (VOSS & KOSSMANN 2012).

Biomasse in Form von Viehdung als Potenzial für kleine Biogasanlagen bietet Vietnam ausreichend, da der Viehhaltungssektor gerade expandiert, dieses besonders in den ländlichen Regionen (VAN NES, W. J. 2006, NGUYEN 2012b). Ebenso schildert LE HUNG (2003) das genutzte Potential vorhandener organischer Biomasse wie Bohnenpflanzen, Zuckerrohr-Bagasse und Bananenblätter, die für eine Verwertung in Biogasanlagen in Frage kommen. Seit 2003 läuft ein Förderprojekt der niederländischen Entwicklungsorganisation SNV, bei dem ländliche Haushalte kleine Biogasanlagen erhalten, um das Gas zum Kochen zu verwerten (VOSS & KOSSMANN 2012, VAN NES, W. J. 2006, NGUYEN 2012b). Bei diesem Projekt soll das vietnamesische Wissen hinsichtlich Bau und Konstruktion von kleinen Biogasanlagen mit der Erfahrung von SNV vereint werden (VAN NES, W. J. 2006), was bis 2011 zu einer Umsetzung von rund 500.000 Dombiogasanlagen mit einem gemauerten, runden Faulbehälter führte (VOSS & KOSSMANN 2012).

Im Mekong Delta können die existierenden Biogasanlagen zwei Ausführungen zugeordnet werden: Dombiogasanlagen und Bioreaktoren (NGUYEN 2012b). Gerade die aus Plastik bestehenden Bioreaktoren sind preiswert und einfach zu installieren (ARNOLD 2010, NGUYEN 2012b). Über die letzten Jahre hat sich die Biogastechnologie auch in der ländlichen Region um Can Tho entwickelt und zu einer hohen Akzeptanz bei der Bevölkerung geführt (ARNOLD 2010). Der Bau von mittleren und größeren Biogasanlagen ist dagegen noch wenig verbreitet. Moderne Technologien der anaeroben Behandlung werden in wenigen Betrieben eingesetzt (VOSS & KOSSMANN 2012).

Bei Abwasserprojekten in Vietnam wird oft kein Wert auf Ressourcenschonung oder -rückgewinnung gelegt (WORLDBANK 2013). In den nächsten Jahren wird diese jedoch immer mehr in den Fokus rücken, vor allem wenn die Nachfrage im Energiebereich weiter steigt. Die Nutzung des bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung produzierten Biogases ist eine Verwertungsmöglichkeit, die besonders für die anfallenden Industrie-klärschlämme rentabel sein kann.

In die Stoffstrombilanz der anaeroben Klärschlammstabilisierung in der Industriezone Tra Noc sind die folgenden In- und Outputpfade eingeflossen.

Tabelle 5-10: Systemgrößen für die anaerobe Klärschlammstabilisierung

Input	Output	Bilanzraum
Klärschlamm	Biogas Faulschlamm	Faulbehälter

In der vereinfachten Stoffbilanz für die anaerobe Klärschlammstabilisierung werden die hochmolekularen Stoffe (Zellulose, Proteine und Lipide) im Klärschlamm mit Hilfe von Enzymen zu gelösten Inhaltsstoffen (Hydrolyse) umgewandelt. Anschließend werden von fakultativ und obligat anaeroben Bakterien kurzkettige organische Säuren, Alkohole, Wasserstoff und Kohlendioxid gebildet (Acidogenese) (BISCHOFBERGER 2005). Die acetogenen Bakterien nutzen die organischen Säuren und Alkohole und bauen sie zu Essigsäure um (Acetogenese). In der Methanogenese schließlich wird von zwei Bakterienarten Methan produziert. Die einen nutzen Kohlendioxid und Wasserstoff, während die zweite Art die Essigsäure umwandelt (SPERLING et al. 2005b).

Das enthaltene Wasser sowie die Nährstoffe verbleiben in der flüssigen und festen Phase des Klärschlammes, können aber ihre chemische Form während der Passage durch den Faulbehälter ändern (ARNOLD 2010). Organisch vorliegender Stickstoff wird beispielsweise zu Ammoniumstickstoff umgewandelt, der sich insbesondere für den Einsatz als Dünger eignet (BABSON & BELLMAN 2013), aber auch hemmend auf den anaeroben Prozess wirken kann.

Umweltfaktoren beeinflussen die biologischen Reaktionen und damit den anaeroben Abbauprozess im Faulbehälter. Die optimalen Bedingungen für eine maximale Methanproduktion in der Faulung sind in der Tabelle 5-11 zusammengetragen.

Tabelle 5-11: Einflussfaktoren der anaeroben Klärschlammstabilisierung

Parameter	Trockenbeet	Beschreibung
<i>pH-Wert</i>	6,8-7,4	Methanogene Bakterien sind pH-sensibel. Fällt der pH-Wert unter 6,0 werden die Methanbakterien gehemmt und es kommt zu einer Anreicherung von organischen Säuren im Faulbehälter.
<i>Temperatur (mesophil)</i>	32-37°C	Temperatur hat einen wichtigen Einfluss auf die Wachstumsrate der Bakterien und dementsprechend verändert sie die Beziehung zwischen Aufenthaltszeit und Leistung des Faulbehälters. Langfristig ist eine stabile Temperatur wichtiger als eine Betriebstemperatur im maximalen Ausbeutebereich.

Parameter	Trockenbeet	Beschreibung
<i>Alkalinität</i>	1.300-3.000 mg/L CaCO ₃	Einer der wichtigsten Parameter, die die Reaktorstabilität beeinflussen. Der Karbonat- Ammonium-Puffer kontrolliert den pH-Wert und die Prozessstabilität.
<i>Aufenthaltszeit</i>	12-20 d	Wichtiger Faktor für die Auslegung des Faulbehälters. Bakterien benötigen ausreichend Zeit sich zu vermehren und die organische Substanz abzubauen. Die Methanproduktion und die Umsetzung von Proteinen, Kohlenhydraten, Fetten, CSB und Organik sind abhängig von der Aufenthaltszeit.
<i>Hemmstoffe</i>	>3.000 mg/L NH ₄ 200 mg/L Sulfid 50-70 mg/L Kupfer >180 mg/L Chrom 30 mg/L Nickel 1 mg/L Zink	Zu hohe Konzentrationen an Schwermetallen, Leichtmetallkationen, Ammonium, Sulfide und einige organische Schadstoffe hemmen den anaeroben Abbau.

Quelle: DOHANYOS & ZABRANSKA (2001) TUROVSKIY & MATHAI (2006) WENDLAND (2008)

Für die anaeroben Stabilisierungsversuche in der Industriezone Tra Noc wurde die Temperatur konstant bei 35°C im mesophilen Bereich gehalten. Umso dichter die Faultemperatur an der Umgebungstemperatur ist, desto wirtschaftlicher kann die anaerobe Klärschlammstabilisierung aufgrund der Energieeinsparungen betrieben werden (BASRAWI et al. 2010). Wichtig in diesem Zusammenhang ist laut DOHANYOS & ZABRANSKA (2001), dass die Temperatur nicht unbedingt im Optimalbereich sein muss, sondern eine konstante Temperatur gehalten wird, da die Biomasse bei jeder Temperatur ein anderes Artenspektrum ausbildet. Von den drei untersuchten Aufenthaltszeiten (12; 16,7 und 20 d) erwies sich die mittlere Aufenthaltszeit mit 16,7 d als die Methanproduktivste, darum wird nachfolgend diese Stoffbilanz betrachtet (siehe Abbildung 5-12).

Im Anschluss an die anaerobe Klärschlammstabilisierung ist zwar eine Entwässerung bei einer landwirtschaftlichen Verwertung nicht zwingend erforderlich, reduziert aber die Transportkosten. Zur Untersuchung der Entwässerungsleistung und der entstehenden Rückbelastung wurden mit dem Reaktorablauf sowohl ein Trocken- als auch ein Vererdungsbeet beschickt (Verfahrenskombination).

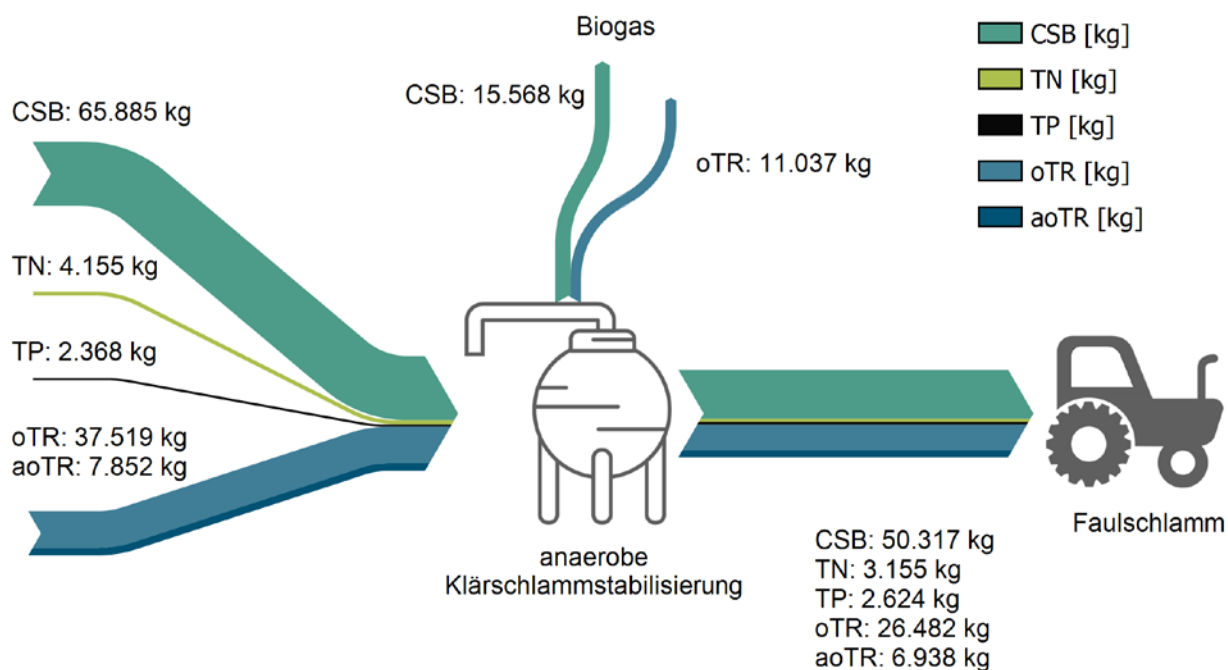


Abbildung 5-12: Stoffstrombilanz der anaeroben Klärschlammstabilisierung

Die pH-Werte der Zu- und Abläufe des Reaktors lagen im optimalen Bereich, so dass es anhand des pH-Wertes keinen Anhaltspunkt für eine Prozessstörung gab. Zudem wurde die Konzentration an organischen Säuren im Ablauf des Reaktors gemessen, die ebenfalls keine Hemmung des anaeroben Abbaus anzeigte.

Stickstoff kann während des anaeroben Abbauprozesses nicht abgebaut werden, sondern unterliegt lediglich Umwandlungsprozessen. Durch die Proteinhydrolyse wird der organisch vorliegende Stickstoff zu Ammonium umgewandelt und hat einen positiven Effekt auf den Zellaufbau der Mikroorganismen, die das Ammonium direkt nutzen können (WENDLAND 2008). Die Stickstoffumwandlung durch die Proteinhydrolyse macht sich durch einen erhöhten Ammoniumgehalt im Outputpfad Faulschlamm bemerkbar. Dies war auch bei den Versuchen in der Industriezone Tra Noc der Fall, wo der Ammoniumgehalt am Gesamtstickstoff von 3,6 % im Input auf 30 % im Output anstieg. Ammonium ist leicht pflanzenverfügbar und vorteilhaft für die Düngewirkung des Faulschlammes (BABSON & BELLMAN 2013).

Ebenso wie Stickstoff werden beim anaeroben Abbau auch Phosphor und Kalium freigesetzt und in eine Form umgewandelt, die leicht pflanzenverfügbar ist. Die Analyse des Gesamtphosphors und des Kaliumgehalts im In- und Output zeigten, wie erwartet, keinen signifikanten Unterschied. Die Konzentration an Phosphat im Faulschlamm, das von den Pflanzen leicht aufgenommen werden kann, verdoppelte sich hingegen. Abweichungen in der Bilanz hinsichtlich Stickstoff und Phosphor deuten auf Messfehler in der Analytik hin.

Die organische Substanz und der gemessene CSB werden durch den anaeroben Abbauprozess abgebaut und zu Methan umgewandelt. 29 % der Masse an organischem

Trockenrückstand und 24 % des im Faulschlamm enthaltenen Chemischen Sauerstoffbedarfs wurden während der anaeroben Klärschlammstabilisierung abgebaut. Bezogen auf den organischen Trockenrückstand wurden über den Versuchszeitraum für die spezifische Gasausbeute etwa $0,164 \text{ Nm}^3/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ an Biogas produziert. Bei einem vollständigen Abbau der Inhaltsstoffe betragen die maximalen Biogasausbeuten für Kohlenhydrate $0,83 \text{ m}^3/\text{kg oTR}$, für Proteine $0,72 \text{ m}^3/\text{kg oTR}$ und für Fette $1,43 \text{ m}^3/\text{kg oTR}$ (DWA 2010). Da nicht alle Inhaltsstoffe im Klärschlamm abgebaut werden, sind die maximal erreichbaren Biogasausbeuten geringer (STEINKE 2010). Laut Literaturangaben ist bei der anaeroben Stabilisierung von Überschussschlamm eine spezifische Biogasausbeute von $0,2\text{-}0,3 \text{ Nm}^3/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ möglich (BISCHOFBERGER 2005).

Als eine Ursache für die geringere Biogasausbeute sind die Inhaltsstoffe des Überschussschlammes der Fischverarbeitung anzusehen, da diese produktionsbedingt einen hohen Anteil an Fetten und Eiweißen enthalten. Fette und Eiweiße sind beim anaeroben Abbau für die Mikroorganismen schwer zugänglich und daher schlechter abbaubar. Durch eigene anaerobe Batchversuche mit Fischfett als Co-Substrat konnten Aufenthaltszeiten von bis zu 60 Tagen je nach Fettanteil festgestellt werden. Zu fetthaltigen Substanzen müssen im Klärschlamm emulgierbar sein und sollten zudem bei der Zugabe eine Temperatur von 20 bis 25°C aufweisen (HABERKERN 2008). Fette sind wegen des hohen Gasbildungspotenzials interessant und beliebt, neigen laut dem Autor aber zu betrieblichen Problemen, da sie sich an der Oberfläche sammeln und Fettkugeln bilden. Ein kompletter Abbau während der gewählten Aufenthaltszeit von 16,7 d ist demnach nicht möglich und eine Biogassteigerung durch die Co-Vergärung von Fischfett nur beschränkt umsetzbar. Hier ist weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf die Umsetzung in der Industriezone Tra Noc notwendig, da mit einer Co-Vergärung nicht nur die Biogasausbeute um mind. 20 % gesteigert werden (FELDE et al. 2006), sondern sich auch die Energieeffizienz der Schlammbehandlungsanlage erhöhen kann.

Neben der anaeroben Klärschlammstabilisierung können Schlämme auch aerob stabilisiert werden, indem der Überschussschlamm länger belüftet wird. Während den Untersuchungen ist mehrfach aufgefallen, dass der Klärschlamm bei rückläufiger Produktion und geringerem Abwasseranfall länger im System gehalten und damit bereits teilstabilisiert wurde. An dieser Situation wird deutlich, dass dem Personal eine Ausbildung für den Kläranlagenbetrieb fehlt und ein stabiler Betrieb der Anlagen nicht gewährleistet werden kann. Dieses Erkenntnis ist hinsichtlich der Abwasser- und Klärschlammqualität zu berücksichtigen. Schwankungen sind demnach nicht ausgeschlossen und für die Auswahl einer Behandlungstechnologie zu beachten. Besonders da SONG & KWON (2004) anführen, dass mesophil-anaerobe Systeme empfindlicher gegenüber Qualitätsschwankungen des Inputmaterials sind.

Eine Bestimmung des Glühverlustes dient als Richtwert für den Stabilisierungsgrad des Klärschlammes. Ist der Glühverlust $<65\%$, wird der Klärschlamm als teilstabilisiert eingestuft, $<55\%$ als voll stabilisiert. Im Zulauf zum anaeroben Reaktor wurden im Durchschnitt Glühverluste von 84% gemessen, so dass der Klärschlamm der Fischverarbeitung während des Versuchszeitraums vor der Faulung als nicht stabilisiert eingeordnet werden kann.

Interessant ist jedoch, dass im Outputstrom durchschnittlich ein Glühverlust von 80% gemessen wurde, der auf einen geringen Abbau der organischen Substanz im Reaktor hinweist. Wird der Abbaugrad η_{0TR} betrachtet, ist festzustellen, dass dieser am Anfang des Untersuchungszeitraums bei $<20\%$ lag, sich aber über den Versuchszeitraum auf knapp 40% erhöhte. ARNOLD (2010) erreichte bei ihren Faulungsversuchen in Can Tho ebenfalls einen Abbaugrad von 40% . Laut Literatur sind bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung Abbaugrade η_{0TR} von $50-65\%$ üblich (GUJER 2007, BISCHOFBERGER 2005, TUROVSKIY & MATHAI 2006), allerdings wird hier als Inputmaterial eine Mischung aus Primär- und Sekundärschlamm angesetzt. BOLZONELLA & PAVAN (2005) untersuchten deshalb die anaerobe Klärschlammstabilisierung lediglich mit Sekundärschlamm als Inputmaterial und stellten auf den untersuchten Kläranlagen einen Abbaugrad η_{0TR} von $13-27\%$ fest. Dieser Abbaubereich ($13-36\%$) konnte auch von anderen Autoren belegt werden (GAVALA & YENAL 2003, LAFITTE-TROUQUE & FORSTER 2002, LIN & CHANG 1997, NAH et al. 2000). Es ist demnach nicht ungewöhnlich, dass der ermittelte η_{0TR} des Überschussschlammes aus der Fischverarbeitung unter den üblichen in der Literatur angegebenen Abbaugraden liegt. Verglichen mit den anderen Untersuchungen, bei denen Überschussschlamm als einzige Inputquelle verwendet wurde, ist der ermittelte η_{0TR} von 40% vergleichbar oder höher (SONG & KWON 2004). Die Leistungsfähigkeit des Reaktors kann darum als gut eingestuft werden.

Bei Überschussschlamm als Inputmaterial wird dem anaeroben System weniger organische Substanz zugeführt und nicht das gesamte Inputmaterial zu Methan umgewandelt, woraus eine niedrigere Biogasproduktion resultiert (BOLZONELLA & PAVAN 2005, GÓMEZ et al. 2006). Bei einer längeren Betriebszeit von großtechnisch umgesetzten Anlagen ist mit einem stabilen Betrieb und ggf. weiteren Steigerungen der Abbau- und Biogasrate zu rechnen (REMY et al. 2014). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf im Zuge einer großtechnischen Umsetzung in Vietnam.

NOVAK et al. (2003) zeigten in ihren Forschungsstudien, dass beim anaeroben Abbau biologische Makromoleküle (Biopolymer) eher als Zellen der Lysis unterliegen, d. h. der Auflösung der Zellen nach Zerstörung der Zellmembran. Durch die gezielte Freisetzung der Zellinhaltsstoffe kann der geschwindigkeitslimitierende Schritt des anaeroben Abbaus, die Hydrolyse, unterstützt werden (WINTER 2003). Hieraus ergibt sich, dass der Stabilisierungsgrad und die Leistungsfähigkeit des Reaktors durch mechanische, chemisch-physikalische oder biologische Vorbehandlungen, die die Zellen aufbrechen, ver-

bessert werden kann (BOLZONELLA & PAVAN 2005, LIER & TILCHE 2001). Zudem wird von LIER & TILCHE (2001) die Co-Vergärung als weitere Möglichkeit zur Biogas- und Leistungssteigerung angeführt. Die Co-Vergärung ist eine kombinierte Behandlung von verschiedenen festen und/oder halbfesten abbaubaren organischen Abfällen, wie Klärschlamm, Grünschnitt, Tierabfälle und industrielle organische Abfallprodukte (LIER & TILCHE 2001).

In der Industriezone Tra Noc wurden anaerobe Batchversuche sowohl zur Co-Vergärung als auch zur alkalischen und sauren Desintegration (physikalisch-chemische Vorbehandlung) durchgeführt. Die Abbildung 5-13 zeigt die spezifische Gasproduktion bei den verschiedenen zusätzlichen Verfahrensvarianten am Beispiel des Klärschlammes aus der Fischverarbeitung.

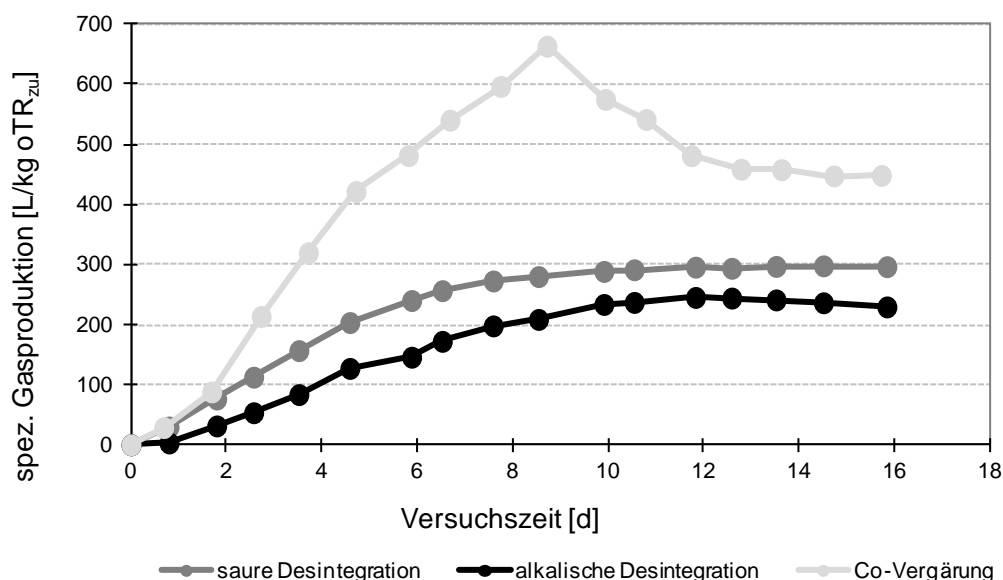


Abbildung 5-13: Spezifische Gasproduktion der sauren und alkalischen Desintegration sowie der Co-Vergärung

Aus den Ergebnissen der anaeroben Batchtests geht hervor, dass eine Steigerung der Biogasausbeute durchaus realisierbar ist. Aus betrieblicher Sicht bedeutet eine Vorbehandlung der Klärschlämme mit der Desintegration einen erheblichen Mehraufwand an Personal, Schulungen, Betriebsmitteln, Energiebedarf und Anlagentechnik. WINTER (2003) wies bei ihren Untersuchungen nach, dass die Anlagengröße hierbei einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Desintegrationsverfahren hat.

Aufgrund der Situationsanalyse erscheint diese Vorbehandlung für die Industriebetriebe vorerst nicht geeignet. Für das Zentralklärwerk sind weitere Untersuchungen und eine wirtschaftliche Betrachtung notwendig, um eine Aussage bezüglich der Eignung treffen zu können. Der notwendige erhöhte Schulungsaufwand für die anaerobe Klärschlammstabilisierung und der Mangel an erfahrenem Betriebspersonal in Vietnam sprechen für eine Umsetzung der anaeroben Klärschlammstabilisierung ohne Vorbehandlung. Über

die Nachrüstung einer Vorbehandlung, sobald das Personal eingearbeitet ist und ein stabiler Betrieb der Schlammbehandlungsanlage vorliegt, kann im Einzelfall zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden.

Technologisch sind Faulbehälter oftmals bereits auf eine Co-Vergärung ausgelegt, zudem ermöglicht der mesophile Temperaturbereich den Einsatz von verschiedenen Co-Substraten (MEYER-KOHLSTOCK & KRAFT 2013). Wichtig und vor einer großtechnischen Umsetzung zu überprüfen, ist die Abbaubarkeit des oTRs im Faulbehälter, die bei 50 % liegen sollte. Des Weiteren sollten Hemmwirkungen des Co-Substrates sowie Schwimmdeckenbildung ausgeschlossen werden (HABERKERN 2008, MEYER-KOHLSTOCK & KRAFT 2013). Als Co-Substrate eignen sich, wie in Vietnam bereits im Kleinmaßstab durchgeführt, Abfälle von Nutztieren, aber auch Speisereste und Reste der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie (MEYER-KOHLSTOCK & KRAFT 2013).

Da bei einer Umsetzung der Co-Vergärung in der Industriezone Tra Noc eine Verwertung lokaler Substrate sinnvoll ist, sind neben den bereits erwähnten Batchtests mit Fischfett Versuche mit dem regelmäßig anfallenden Grünschnitt vorgenommen worden. Die spezifische Gasproduktion konnte mit beiden Co-Substraten gesteigert werden. Bei dem Co-Substrat Grünschnitt wurde die spezifische Gasproduktion auf über 600 L/kg oTR_{zu} gesteigert (siehe Abbildung 5-13). Da für die Co-Vergärung keine kontinuierlichen Durchlaufversuche durchgeführt wurden, besteht auch hier weiterer Forschungsbedarf vor einer großtechnischen Umsetzung. Insbesondere da die Zugabe von faserigen, holzhaltigen organischen Abfällen als Co-Substrat eine gezielte vorgeschaltete Materialzerkleinerung für die Pumpfähigkeit und gute Durchmischungsfähigkeit mit dem Klärschlamm in der Großtechnik erforderlich macht (LAMPERT et al. 2011).

Bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung können sich pathogene Mikroorganismen nicht vermehren, sondern werden im Gegenteil reduziert (SONG & KWON 2004), weshalb die direkte Verwertung des Faulschlammes in der Landwirtschaft möglich ist. Zur Reduzierung der Transportkosten ist eine nachgeschaltete Entwässerung zu empfehlen. In der Industriezone Tra Noc wurden zur Untersuchung der Entwässerungsleistung sowie der Rückbelastung durch das Schlammwasser die bereits in Kapitel 5.1.3 dargestellten natürlichen Entwässerungsverfahren Trocken- und Pflanzenbeete der anaeroben Klärschlammstabilisierung nachgeschaltet. Im Wesentlichen werden die Entwässerungseigenschaften eines Faulschlammes durch die Zusammensetzung und Konzentration des Rohschlammes bestimmt (DWA 2008). An den Untersuchungszeitraum wurde eine 14-tägige Ruhephase für die Trocken- und Pflanzenbeete angeschlossen und anschließend der TR-Gehalt bestimmt. Das Pflanzenbeet wies einen TR von 10 %, das Vererdungsbeet von 20 % auf. MAESENEER (1997) erreicht bei seinen Entwässerungsversuchen mit Schilfpflanzen einen TR von 25 %. Auch andere Autoren erreichten deutlich höhere TR-Werte (vgl. Kapitel 5.1.3) bei ihren natürlichen Entwässerungsversuchen, wobei diese mit aerob stabilisiertem Klärschlamm durchgeführt wurden.

JORDAN (2006) untersuchte die Entwässerungsleistung von Faulschlamm durch die Klärschlammvererdung und weist daraufhin, dass Faulschlamm bei mechanischen Entwässerungsverfahren aufgrund des vermehrten Abbaus an organischer Substanz ein besseres Entwässerungsergebnis erzielt. Die fehlende Möglichkeit des Auswaschens einzelner Korngrößen im Faulbehälter führt zu einer ungleichförmigen Partikelgrößenverteilung und der Partikelfeinanteil steigt an (JORDAN 2006). Bei der natürlichen Entwässerung kann ein hoher Partikelfeinanteil die Poren der Drainage zusetzen und die Entwässerungsleistung der Trocken- und Pflanzenbeete reduzieren.

DWA (2008) stellt in ihrem Merkblatt 383 die wesentlichen Einflussgrößen auf die Entwässerbarkeit von Faulschlamm zusammen. Der pH-Wert wird durch die Pufferstärke beeinflusst, maßgeblich ist das primäre Ammonium-Hydrogencarbonat-Puffersystem. Dieses wirkt sich auf die Ionenkonzentration des Faulschlammes aus, die als elektrische Leitfähigkeit ausgedrückt wird, und beeinträchtigt die Flockenbildung. Zudem führen hohe pH-Werte und hohe PO_4^{3-} -Konzentrationen zu einem verstärkten Wasserbindevermögen im Schlamm. Die Kombination mit Hydrogelen, die beim Abbau von Faulschlamm entstehen und hauptsächlich aus Eiweißverbindungen und Polysacchariden bestehen, verstärkt das Wasserbindevermögen. Hierdurch kann es zu Ausfällungen von Calciumhydroxophosphaten kommen, die wiederum größere Mengen Hydratwasser speichern. Tabelle 5-12 zeigt die wichtigsten Schlammkennwerte im Vergleich zu den Richtwerten für eine gute Entwässerungsleistung.

Tabelle 5-12: Schlammkennwerte des Faulschlammes im Vergleich mit Richtwerten für eine gute Entwässerungsleistung

Parameter	Richtwert	Faulschlamm
<i>Elektrische Leitfähigkeit</i>	10 mS/cm	3,5 mS/cm
<i>pH-Wert</i>	< 7,5	7,4
<i>Phosphat</i>	< 50 mg/L	293 mg/L
<i>Ca; Mg</i>	> 100 mg/L Ca	212 mg/L Ca 79 mg/g Mg
<i>Feststoffe (GV;GR)</i>		80 % GV 20 % GR

Die gemessene elektrische Leitfähigkeit deutet auf keine Beeinträchtigung der Entwässerungsleistung hin. Der pH-Wert hingegen liegt in einem kritischen Bereich, denn wie EWERT (2006) bei seinen Untersuchungen feststellte, ist der pH-Bereich von 7-7,5 bei Ca-Konzentrationen von 100 mg/L bereits kritisch für Ausfällungen. Erfahrungsgemäß muss der pH-Wert über 7,5 liegen, damit leicht lösliches Calciumhydrogenkarbonat in

das schwer lösliche Calciumcarbonat umgewandelt wird. Calciumphosphate fallen erst bei pH-Werten über 8, oft gemeinsam mit Magnesiumammoniumphosphat (MAP) aus. Durch die Umwandlung von TP zu PO_4^{3-} im Faulbehälter steigt die Konzentration des gelösten Phosphors an und in Abhängigkeit vom pH-Wert wird MAP gebildet. Die Anwesenheit von PO_4^{3-} entscheidet somit über die Art der Kristallisation (Calciumcarbonat- oder MAP-Kristallisation) (EWERT 2006).

In der Industriezone Tra Noc ist keine Kläranlage mit einer P-Elimination ausgestattet, so dass die hohen P-Konzentrationen bereits durch den Rohschlamm ins System eingetragen werden. Insbesondere aus der Fischproduktion sind wasserspeichernde Mechanismen von Phosphaten im Zusammenspiel mit Fetten und Proteinen bekannt, die eine zentrale Rolle im Hinblick auf die Entwässerungsleistung spielen (KOPP 2006, DWA 2008). EWERT (2006) konnte durch die gezielte MAP-Fällung den PO_4 -Gehalt im Faulschlamm reduzieren und dadurch eine deutliche Verbesserung der Entwässerungsleistung erzielen. Eine verstärkte P-Elimination ist somit empfehlenswert. Darüber hinaus würde eine Steigerung des Abbaugrades den organischen Anteil im Faulschlamm reduzieren und hierdurch ebenfalls zur Verbesserung der Entwässerbarkeit beitragen.

Das anfallende Sickerwasser ist wegen der hohen Konzentrationen an organischem Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor üblicherweise einer Kläranlage zuzuführen (JORDAN 2006). Eine weitere Möglichkeit der Wiederverwendung ist aufgrund des erhöhten Nährstoffgehalts der Einsatz in der Aquakultur oder der Landwirtschaft, was in Vietnam oftmals mit ungereinigtem Abwasser umgesetzt wird (WHO 2006). TRINH et al. (2013) führen an, dass bis zu 23 ha der umliegenden Reisfelder in Can Tho mit Abwasser bewässert werden können und dadurch nicht nur 3 Reisernten pro Jahr möglich sind, sondern auch mineralische Dünger eingespart werden. Tabelle 5-13 vergleicht die Sickerwasserqualität der Trocken- und Vererdungsbeete mit der gültigen technischen Regel QCVN40:2011/BTNMT (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 5-13: Vergleich der Sickerwasserqualität der Trocken- und Vererdungsbeete mit der technischen Regel QCVN40:2011/BTNMT

Parameter	Einheit	Sickerwasser		QCVN 40:2011	
		Pflanzenbeet	Trockenbeet	A	B
pH-Wert	[-]	7,8	8,3	6-9	5,5-9
BSB ₅	[mg/L]	52	34	30	50
CSB	[mg/L]	179	169	50	100
AFS	[mg/L]	58	57	50	100

Parameter	Einheit	Sickerwasser		QCVN 40:2011	
		Pflanzenbeet	Trockenbeet	A	B
NH ₄ -N	[mg/L]	109	97	5	10
N _{ges}	[mg/L]	114	142	20	40
P _{ges}	[mg/L]	42	43	4	6
Coliforme Bakterien	[MPN/100mL]	n. n.	n. n.	3.000	5.000

Im Vergleich der Sickerwässer mit der QCVN40:2011/BTNMT wird deutlich, dass besonders die hohen Nährstoffgehalte eine Nachbehandlung in der Kläranlage erfordern und eine direkte Nutzung in der Aquakultur oder der Landwirtschaft nicht zu empfehlen ist. Von der eingetragenen Wassermenge wurden bei den überdachten Trockenbeeten 87 % über den Sickerwasserpfad ausgetragen, während in den Vererdungsbeeten trotz fehlender Überdachung nur 75 % das System über das Sickerwasser verließen. Bei der Auslegung einer anaeroben Klärschlammstabilisierung mit anschließender natürlicher Entwässerung ist demnach eine Rückführung des Sickerwassers zwingend erforderlich und einzuplanen.

Wie bereits erwähnt, kann der Faulschlamm direkt als Dünger eingesetzt werden. Im Mekong Delta wird der Gärrest der Biogasanlagen verbreitet in der Aquakultur eingesetzt. ARNOLD (2010) und NGUYEN (2012b) berichten auch von einigen Landwirten, die mit den Gärresten ihre Reisfelder und Obstplantagen düngen. Die direkte Düngung mit Faulschlamm minimiert die Stickstoff- und Kohlenstoffverluste, aber beinhaltet ein höheres hygienisches Risiko hinsichtlich der pathogenen Mikroorganismen (ARNOLD 2010). Da für die anderen Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc keine Versuche zu einer nachgeschalteten natürlichen Entwässerung durchgeführt wurden, wird hier trotz des hohen Wassergehalts, der einen Transport erschwert, die Faulschlammqualität und nicht der Schlamm Boden der Beete für die Bewertung des Endproduktes angesetzt.

Tabelle 5-14: Faulschlammqualität der Fischverarbeitung

Parameter	Faulschlamm	Grenzwert	Düngewirkung
<i>Schwermetalle [mg/kg TR]</i>			
Cadmium	7,4	3	
Chrom	38	120	
Blei	8,5	150	

Parameter	Faulschlamm	Grenzwert	Düngewirkung
Nickel	27	100	
Kupfer	87	600	
Zink	585	1.800	
<i>Nährstoffe [g/kg TR]</i>			
Calcium	19		niedrig
Kalium	6,5		mittel
Magnesium	7,5		mittel

Die Grenzwerte der Schwermetalle werden bis auf Cadmium eingehalten. Mit einem durchschnittlichen Gehalt von 7,4 mg/kg TR ist der Grenzwert von 3 mg/kg TR laut der deutschen Novelle der ABFKLÄRV (2012) deutlich überschritten. Auch wenn in Vietnam momentan noch keine Grenzwerte für eine Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft vorliegen, ist die stoffliche Verwertung kritisch zu betrachten. Eine Reduzierung des Cadmiumgehaltes ist an der Eintragsquelle möglich. Hierzu ist ein umfangreiches Messprogramm der verschiedenen Produktionsabwässer, die in die Kläranlage eingeleitet werden durchzuführen. Damit kann für die Verwertung des Faulschlammes momentan nur eine thermische Verwertung empfohlen werden.

Die mikrobiologischen Untersuchungen haben ergeben, dass keine erhebliche Reduzierung der Mikroorganismen während der anaeroben Klärschlammstabilisierung stattgefunden hat. Das Inputmaterial sowie der Faulschlamm wiesen eine KBE/g TR von $\log 10^5$ auf. Eine Reduzierung der Keimzahlen um $\log 10^2$ konnte festgestellt werden, in dem Zeitraum in dem die höheren Abbauraten von 40 % gemessen wurden. Ein stabiler Betrieb des Faulbehälters trägt somit zu einer Reduzierung der pathogenen Mikroorganismen bei.

5.2 Energiebilanz

Das Zusammenspiel zwischen Energie und Wasser hat in den letzten Jahren auch in Vietnam an Bedeutung gewonnen. Beide Ressourcen steigen in ihren Verbräuchen und die Regierungen, insbesondere in Entwicklungsländern, kämpfen darum eine sichere Versorgung für die Bevölkerung zu gewährleisten. So gut wie alle energieerzeugenden Prozesse benötigen eine signifikante Menge an Wasser, umgekehrt wird zur Wasseraufbereitung und -behandlung Energie benötigt, häufig in Form von elektrischer Energie (RODRIGUEZ et al. 2013).

Stoffbilanzen, Energieverbräuche und Kosten zählen damit zu den Basisinformationen

zur Auswahl einer geeigneten Behandlungstechnologie (ZHANG & MATSUTO 2011). Deshalb werden nachfolgend Energiebilanzen für die ausgewählten Technologien am Beispiel der Fischverarbeitung dargestellt. Die Energieinhalte des Klärschlammes oder der Klärschlammgemische sind jeweils mit dem Heizwert in die Energiebilanz eingegangen.

Kompostierung

Bei der zweistufigen Kompostierung aus Intensiv- und Nachrotte wird Energie für die Materialaufbereitung und -mischung, die Belüftung, die Befüllung und Entleerung der Rotteboxen sowie für das Umsetzen der Mieten benötigt. Je nachdem, ob die Siebung händisch oder maschinell durchgeführt werden soll, wird hier zusätzlich Energie verbraucht.

Für die in der Industriezone Tra Noc durchgeführten Kompostierungsversuche im Kleinmaßstab sind die Arbeitsschritte Materialaufbereitung und -mischung händisch durchgeführt worden. Um auch für die Großtechnik den maschinellen/technischen Aufwand so gering wie möglich zu halten, gehen folgende Aggregate für die Materialaufbereitung und -mischung in die Energiebilanz ein: Trockenbeete zur Klärschlamm-entwässerung und ein Radlader mit Multi-Misch-Schaufel, der den Klärschlamm sowie das Strukturmaterial mischt und homogenisiert. Eine detaillierte Auflistung des Energieverbrauchs für Trockenbeete wird unter der separaten Energiebilanz beschrieben.

Zusätzlich zur Mischung des Kompostmaterials wird der Radlader für die Befüllung/Entleerung der Intensivrotteboxen sowie das Umsetzen der Mieten in der Nachrotte eingesetzt. Bei der angesetzten Anlagengröße wird für den Radlader ein Energieverbrauch von 13,2 L Diesel/t TR angesetzt (SHAMMAS & WANG 2007a).

In der 14-tägigen Intensivrotte wird das Kompostmaterial in den Rotteboxen durchgängig belüftet. Da für die Kompostierungsanlage eine kontinuierliche Auslastung vorausgesetzt wird, geht eine Belüftungszeit von 8.760 h/a in die Energiebilanz ein. Für die Belüftung in warmen Klimaten setzt DRÜCKER (2009) den Energieverbrauch von 1 kW/h an. In der Nachrotte wird Energie lediglich für das Umsetzen benötigt. Der Abbau der Biomasse durch die Mikroorganismen verbraucht Sauerstoff und Kohlenstoff, hingegen werden Wärme, Kohlenstoffdioxid sowie Wasser freigesetzt (FACH 2013).

Aufgrund der klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet kann trotz der überdachten Mieten von Verdunstungsprozessen durch die Luft in der Nachrotte ausgegangen werden. Die Verdunstung hängt von der Strahlung, dem Sättigungsdefizit, der Temperatur auf der verdunstenden Oberfläche und der Intensität der Luftbewegung ab (LESER 1997). Um den Aggregatzustand des enthaltenen Wassers im Kompost von flüssig zu gasförmig zu ändern, entzieht das Wasser Verdunstungswärme. Da praktisch keine Energie zugeführt wird, verändert sich die Enthalpie des Luft-Wassergemisches nicht. Es kommt zu einer Veränderung des Wärmeinhalts der Luft. In dem vorliegenden Beispiel der Kompostierung ergibt sich ein Delta des Wärmeinhalts zwischen Mietenin-

nenraum und Umgebungsluft von 7,9 kJ pro 1 kg Luft, so dass nur eine geringe Veränderung des Wärmeinhalts vorliegt. In der Intensiv- und Nachrotte ist eine Wassermenge von 277 kg Wasser pro 1 t zugeführtem Rottegut verdunstet. Da die Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 2,44 kJ pro 1 g Wasser liegt, entspricht das verdunstete Wasser bezogen auf ein Jahr einer Wärmemenge von 24,5 MWh/a. Sie ergibt sich in der Energiebilanz aus der Differenz des Heizwertes zu Beginn und am Ende der Nachrotte. Da die Verdunstungswärme in der vorliegenden Fallstudie gering ist, können eine fehlerhafte Probenahme, eine inhomogene Probe oder Fehler bei der Bestimmung des Glühverlustes diesen Wert in der theoretischen Betrachtung verdecken.

Um bei der notwendigen Siebung des fertigen Kompostes an Maschinenteknik zu sparen, wird dieser Prozessschritt händisch durch das Kläranlagenpersonal vorgenommen. Damit wird keine weitere Energie dem Bilanzraum zugeführt. In Abbildung 5-14 ist die Energiebilanz für die Kompostierung in der Industriezone Tra Noc dargestellt.

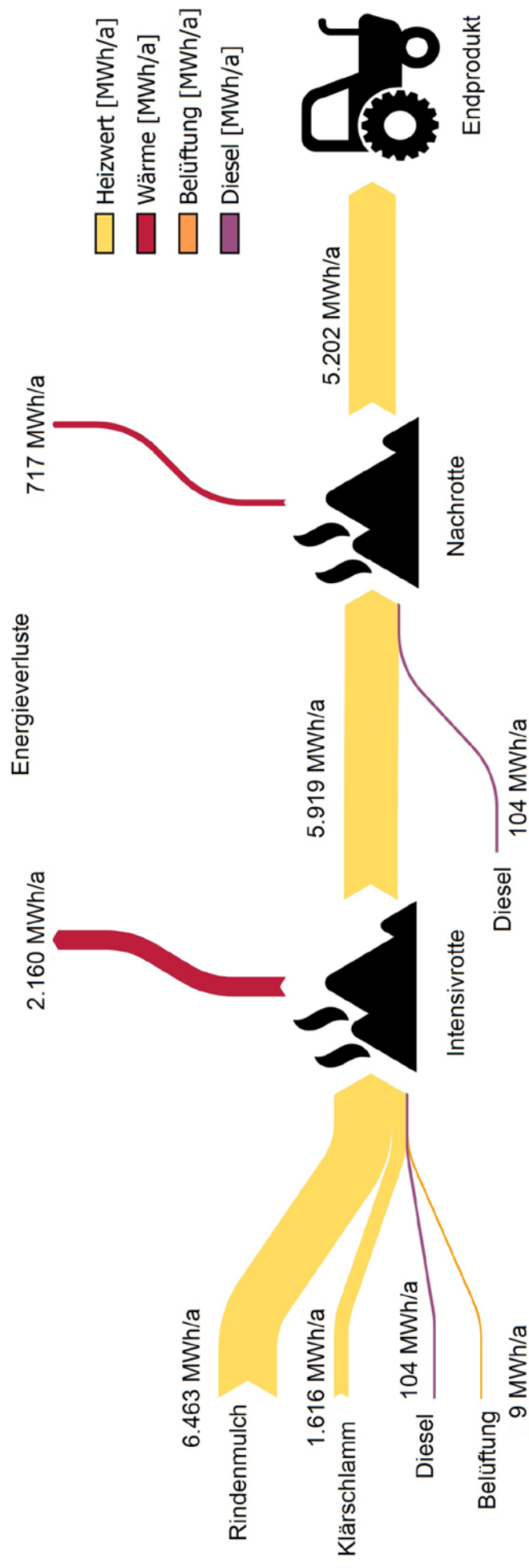


Abbildung 5-14: Energiebilanz der Kompostierung

SPRINGER (2010) gibt einen Gesamtprimärenergiebedarf für unbelüftete Mietenkompostierung mit Radladerumsetzung von 92 MJ/t Feuchtmasse_{input} an, bei gekapselten Anlagen liegt der Energiebedarf bereits bei 396 MJ/t Feuchtmasse_{input}. Bezogen auf eine Tonne Output liegt der Gesamtenergiebedarf bei der teilgeschlossenen Kompostierung bei 22-62 kWh/t (SPRINGER 2009). LAMPERT et al. (2011) setzen für die teilgeschlossene Kompostierung einen Gesamtenergiebedarf bezogen auf das Ausgangsmaterial von 70 kWh/t. Die Angaben schwanken und sind abhängig von der eingesetzten Technik. Die hier zitierten Autoren beziehen ihren Gesamtenergiebedarf auf technisch hoch versierte Anlagen und die Primärenergie, weshalb der Energiebedarf nicht vergleichbar mit der Energiebilanz für die Industriezone Tra Noc sein kann.

Wurmkompostierung

Die Wurmkompostierung ist eine Behandlungstechnologie, die nur einen sehr geringen Energieverbrauch aufweist. Wird die Wurmkompostierungsanlage richtig geplant, ist lediglich eine Entwässerung des Klärschlammes vorzuschalten, damit die Kompostwürmer nicht sterben (WANG et al. 2007a). Um wenig Maschinentechnik einzusetzen, werden Trockenbeete zur Entwässerung des Klärschlammes vorgeschaltet. Diese werden nachfolgend hinsichtlich des Energieverbrauchs erläutert. Alle weiteren Prozessschritte werden durch Personal durchgeführt und benötigen keinen Energieeinsatz. Hierzu gehört das Befüllen der Beete, Entnahme des fertigen Wurmkompostes, Siebung und ggf. Aussortierung der Würmer sowie die Abfüllung des Materials in Säcke zur Vermarktung (nicht bei direkter Verwertung). Um eine Austrocknung der Kompostwürmer aufgrund der Verdunstungsprozesse zu vermeiden, ist gegebenenfalls eine Bewässerung des Kompostmaterials notwendig (WANG et al. 2007a, SHIVAKUMAR et al. 2009). Die Verdunstungsprozesse sind vergleichbar mit denen der Kompostierung und werden hier nicht weiter erläutert.

Abbildung 5-15 zeigt die Energiebilanz für die Wurmkompostierung am Beispiel der Fischverarbeitung.

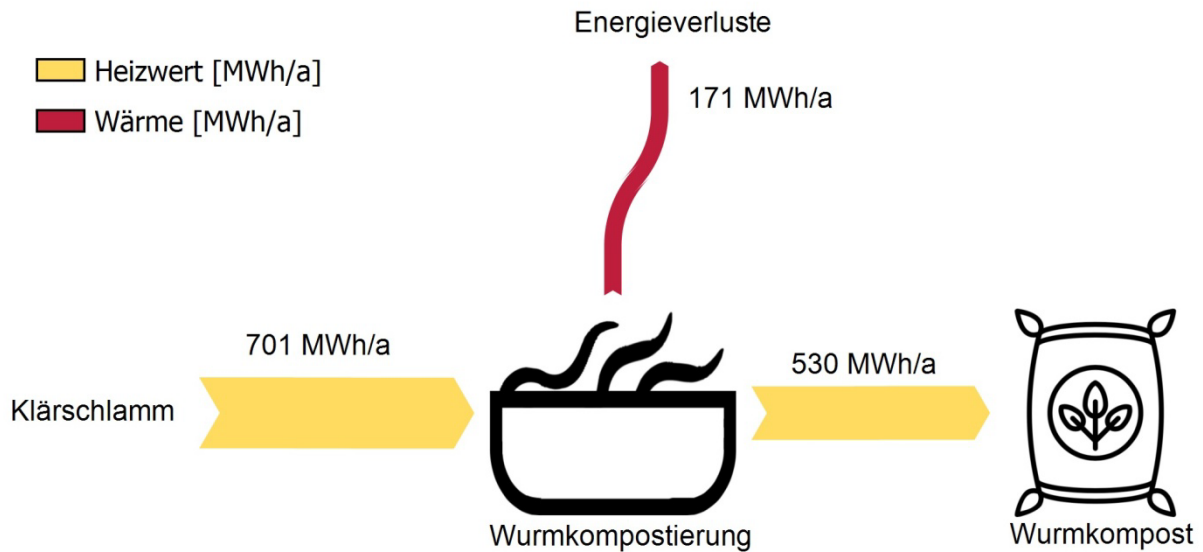


Abbildung 5-15: Energiebilanz der Wurmkompostierung

Trockenbeete

Trockenbeete sind zwar eine der meistverbreiteten Schlammbehandlungstechnologie zur Entwässerung, zählen jedoch zu den arbeitsintensiveren. Demzufolge ist der Energieaufwand zum Betrieb von Trockenbeeten gering.

Eine Pumpe beschickt die Trockenbeete mit dem flüssigen Überschussschlamm aus der Kläranlage bis die Beschickungshöhe erreicht ist (Auslauf mit Rinnen oder Rohren). Anschließend wird der Klärschlamm durch die Filtration und Verdunstung bis zur notwendigen Feststoffkonzentration entwässert. Die Räumung der Trockenbeete kann entweder maschinell mit dem Radlader oder manuell durch das Personal erfolgen. Die Drainageschicht der Trockenbeete muss regelmäßig mit dem Radlader erneuert werden. Die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs der Trockenbeeten erfolgte nach WANG et al. (2007b) und bezieht die maschinelle Räumung der Beete, den Sandaustausch und den Stromverbrauch der Pumpe zur Beschickung mit ein. Abbildung 5-16 stellt die Energiebilanz für die Trockenbeete dar.

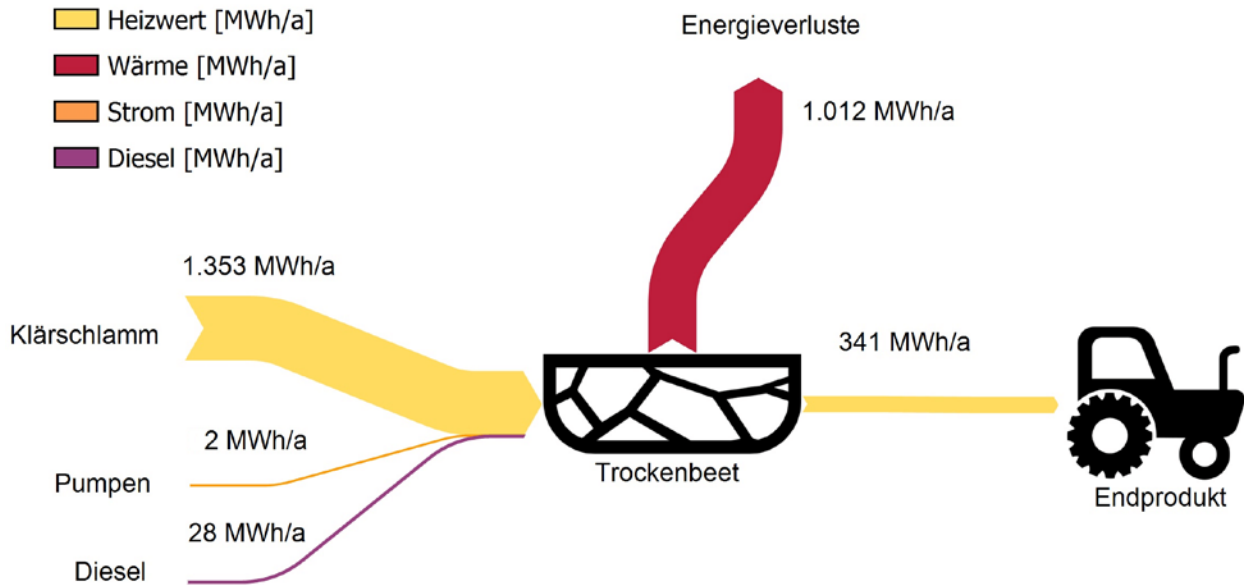


Abbildung 5-16: Energiebilanz der Trockenbeete

Vererdungsbeete

Da die Vererdungsbeete eine Weiterentwicklung der Trockenbeete sind, zählen sie ebenso zu den Behandlungstechnologien die einen geringen Primärenergieverbrauch aufweisen. Die Beschickung erfolgt ebenfalls direkt nach Abzug des Überschussschlammes ohne weiteren Entwässerungsschritt. Laut KUHLENDahl & BREITHAUPT (2011) sind lediglich Pumpen zur Beschickung und ein Motorschieber an Energieinput notwendig, die jährlich pro 10.000 EGW 3,5 kWh/a verbrauchen. Für das vorliegende Beispiel werden aufgrund der höheren Einwohnerequivalente 20 % auf den Energieverbrauch aufgeschlagen und 4,2 MWh/a als Energieverbrauch angesetzt.

Im Gegensatz zu den vorherigen Behandlungstechnologien erfolgt bei diesem Verfahren eine verbesserte Schlammentwässerung durch die Transpiration der Pflanzen und ihrer Wurzeln im Schlamm Boden (JORDAN 2006). Gesonderte Messungen zur Transpirationsleistung der Pflanzen sind nicht durchgeführt worden, weshalb eine Differenzierung zwischen Evaporation und Transpiration nicht vorgenommen wurde. Da die Beeträumung erst nach 8-10 Jahre vorgenommen wird, ist eine jährliche Umlegung des Energieverbrauchs nicht sinnvoll und wird in der Energiebilanz vernachlässigt.

Die Abbildung 5-17 stellt die jährliche Energiebilanz für die Entwässerung mittels Vererdungsbeeten dar.

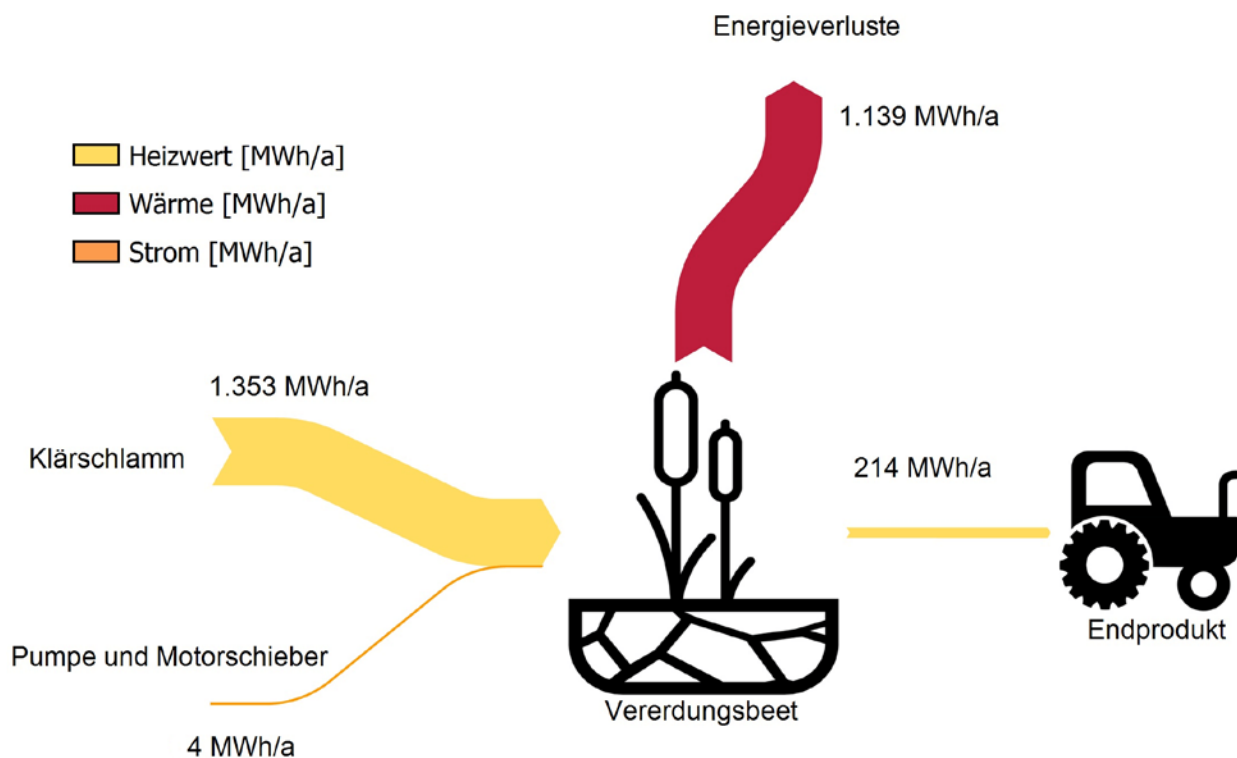


Abbildung 5-17: Energiebilanz der Vererdungsbeete

Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Die Behandlungsmethode anaerobe Klärschlammstabilisierung ist die Hightech-Variante unter den ausgewählten Alternativen. Es existieren, wie in Kapitel 5.1.4 dargestellt, einfache Umsetzungen für die Vergärung von Bioabfällen, für den Einsatz in der Industriezone Tra Noc bietet sich ein aufwendigeres und damit energieintensiveres Verfahrensschema an.

Nach Abzug des Überschussschlammes aus dem Nachklärbecken erfolgt eine Eindickung des Klärschlammes, um eine Beschickung des Faulbehälters mit einem Feststoffgehalt von 3-5 % TR zu gewährleisten. Außerdem ist der Energieverbrauch der Schlammbehandlung abhängig von der zu behandelnden Schlammmenge (MÜLLER et al. 1994), so dass eine Reduzierung des Wassergehaltes auch aus energetischer Sicht sinnvoll ist.

Trockenbeete sind für dieses Verfahren als eine Entwässerungsmethode denkbar, bieten sich aufgrund der notwendigen Einstellung eines konstanten TR-Wertes und der Pumpfähigkeit des Schlammes für diesen Prozessschritt nicht an. Vielmehr kommen für die maschinelle Eindickung von Überschussschlamm Trommel- oder Bandsiebe sowie Dekanter zum Einsatz (MÜLLER et al. 1994), deren mittlerer Stromverbrauch mit 0,3 kWh/m³ angegeben wird (MÜLLER 1999). Eine weitere energetische Einsparung ist durch eine verbesserte Schlammeindickung in der Nachklärung in Verbindung mit einer reduzierten Rücklaufschlammförderung zu erreichen (BAUMANN & ROTH 2008). Notwen-

dig sind demnach eine energetische Optimierung der vorhandenen betriebseigenen Kläranlage sowie eine intensive Schulung des Personals vor Ort.

Bei der Schlammfäulung wird die Energie hauptsächlich für die Umwälzung bzw. Durchmischung des Faulbehälters benötigt. Schraubenschaufler für die Umwälzung weisen nicht nur in der Effizienz, sondern auch energetisch Vorteile gegenüber dem Umpumpen und der Faulgaseinpressung auf (BAUMANN & ROTH 2008). Als Energieverbrauch werden für die Fallstudie in der Industriezone Tra Noc $1,6 \text{ kWh/m}^3$ mit einer Mindestumwälzzeit von 6 Stunden pro Tag angesetzt (BAUMANN & ROTH 2008, DWA 2013, BISCHOFFSBERGER 2005).

Der Energiebedarf für die Beschickung mit Exzentrerschneckenpumpen ist relativ gering und abhängig vom TR-Gehalt des Schlamms. Als spezifischer Stromverbrauch wird für dieses Beispiel der Fischverarbeitung $4,8 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ festgelegt (DWA 2013).

Prozesswärme wird für die konstanten Temperaturen des anaeroben Stabilisierungsprozesses benötigt. Bei der mesophilen Schlammbehandlung sind konstante 35°C notwendig, weshalb auf eine Faulraumheizung oftmals nicht verzichtet werden kann. Der Energiebedarf der Faulraumheizung ist abhängig von der Schlammmenge und Schlammtemperatur (Temperaturdifferenz Faulraum/Außenluft) (MÜLLER et al. 1994). Zudem kommt es zu Transmissions- sowie zu Erzeugungs-, Speicher- und Verteilungsverlusten, die nach LINDTNER (2008) für die Energiebilanz berechnet wurden. Als Faulbehältervolumen sind für das vorliegende Beispiel 900 m^3 mit einem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen von 0,45 (entspricht 406 m^2) gewählt worden. Der Energieverlust der Fäulung verdeutlicht, dass unter den tropischen Bedingungen aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Faulraum und Umgebungsluft ein geringerer Energiebedarf aufzubringen ist als in den gemäßigten Breiten. Bei eigenen Untersuchungen zur anaeroben Klärschlammstabilisierung bei Umgebungstemperatur konnten über einen Zeitraum von drei Wochen keine Einschränkungen hinsichtlich Biogasproduktion und Faulschlammqualität festgestellt werden. Bewährt sich die Fäulung bei Umgebungstemperatur ist der Faulprozess in tropischen Klimaten mit einem deutlich geringerem Energie- und Materialbedarf zu betreiben (keine Faulraumheizung und Isolierung notwendig). Exemplarisch ist der Energieverlust der Fäulung dennoch in Abbildung 5-18 dargestellt.

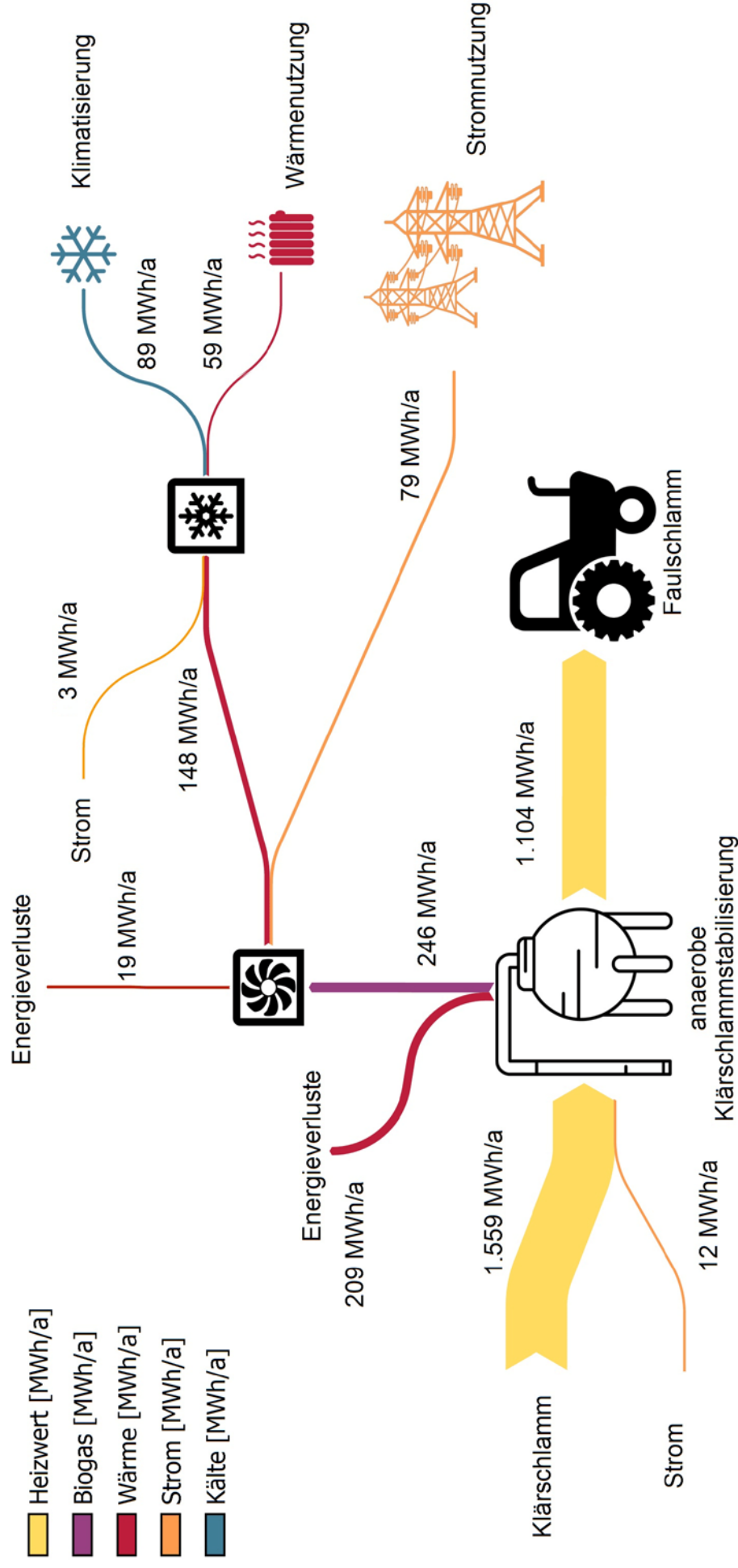


Abbildung 5-18: Energiebilanz der anaeroben Klärschlammstabilisierung

Der Vorteil der anaeroben Klärschlammstabilisierung liegt in der Produktion von Biogas, dessen Energieinhalt mithilfe der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in verwertbare elektrische und thermische Energie umgewandelt werden kann. Hierzu werden fast ausschließlich Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren verwendet, die eine geringe Wartung benötigen (FNR 2010). Durch den Einsatz von BHKWs können dezentral und flexibel das anfallende Biogas des Faulbehälters genutzt und die Energiekosten gesenkt werden. Durch die hohen Wirkungsgrade, die ein Maß für die effektive Nutzung der zugeführten Energie darstellen, sind mittlerweile kleine BHKWs für wirtschaftlich energietechnische Konzepte in kleinen und mittleren Unternehmen einsetzbar (FRAKO POWER SYSTEMS o. J., FNR 2010).

Wie die Energiebilanz der anaeroben Klärschlammbehandlung zeigt, ist der Wärmebedarf in Vietnam aufgrund der klimatischen Verhältnisse relativ gering, so dass die klassische Nutzung der Abwärme zur Heizung von Betriebsgebäuden und Faulraumheizung als wenig sinnvoll erscheint. Vielmehr sollte der wachsende Kühlbedarf zur Kälteerzeugung und Klimatisierung gedeckt werden (WU & WANG 2006), der insbesondere bei den notwendigen klimatisierten Produktionshallen der fischverarbeitenden Industrie in Vietnam hoch ist.

Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) mit Ab- und Adsorptionsanlagen bietet eine gute Alternative, um die Energieversorgung bei Stromausfällen zu garantieren, Emissionen zu reduzieren, den Energiegehalt des Biogases wirtschaftlich zu nutzen und die notwendige Kälte für die Produktion im dezentralen Bereich zu gewährleisten (WU & WANG 2006, BRUNO et al. 2009).

Die Kältemaschine ist je nach Einsatzbereich und Kosten auszuwählen. Im Gegensatz zu Kompressionskältemaschinen, die niedrigere Investitionskosten aufweisen, ist eine Amortisierung von Ab- und Adsorptionskältemaschinen über die geringeren Betriebskosten möglich (SCHINDLER 2012). Für das vorliegende Beispiel wurde zur Biogasnutzung ein BHKW mit einer Adsorptionsanlage (Auslegungsdaten Firma InvenSor) ausgewählt, da diese weniger elektrische Energie sowie Wartung erfordert und somit für die vorherrschenden Rahmenbedingungen als geeignet angesehen wird.

Für eine Einspeisung des erzeugten Stroms ins öffentliche Netz fehlt momentan in Vietnam die notwendige Infrastruktur, so dass sich eine Nutzung direkt auf dem Firmengelände anbietet. Mit der erzeugten Kälte kann beispielsweise ein Betriebsgebäude (ca. 552 m²; 20 °C) für 8 h/d klimatisiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit den Faulbehälter mit der Abwärme der AdKM auf einer konstanten Temperatur zu halten. Die Energiebilanz macht deutlich, dass die anaerobe Behandlung den Klärschlamm nicht nur stabilisiert, sondern auch zur Ressourcenschonung beiträgt.

Im Anschluss an die Stoff- und Energiebilanzen sollte eine Anlagenplanung zur detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung folgen (SCHINDLER 2012).

5.3 Kostenvergleich

Die zur Verfügung stehenden Daten für die Schlammbehandlungskosten in Vietnam sind sehr limitiert und beschränken sich auf einzelne Analysen der Fäkalschlammbehandlung. Die Datenlage erlaubt demnach keine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Fallbeispiele der Industriezone Tra Noc, es können lediglich bestehende Kostenfunktionen, soweit vorhanden, herangezogen werden.

Aufgrund des starken Einflusses der nationalen Rahmenbedingungen auf die Kostenfunktionen, können oftmals nur Annahmen zur Näherung getroffen werden, um eine Übertragung der Kostenfunktionen auf die nationalen Gegebenheiten zu berücksichtigen (ZESSNER & LAMPERT 2010). Hinzu kommt, dass eine Kostenschätzung der Schlammbehandlung aufgrund der Vielfalt an involvierten Parametern erschwert wird (GHAZY 2011). Auf Basis von KALDERIS et al. (2010) können die auf die Kosten einwirkenden Parameter wie folgt beschrieben werden:

- Physikalische und chemische Charakterisierung des vorliegenden Klärschlammes
- Klärschlammmenge
- Potenzial zur Verwertung
- Gesetzliche Rahmenbedingungen
- Flächenverfügbarkeit und Grundstückspreise
- Energieverbrauch und -kosten
- Personalbedarf und -kosten.

Für den groben Kostenvergleich der Fallstudie Industriezone Tra Noc werden die Investitionskosten angesetzt, die einmalig für die Erstellung der Schlammbehandlungsanlage aufgewendet werden müssen (LAWA 2005). Unter Betriebskosten werden die Sachkosten (Betriebs- und Hilfsmittel, Materialkosten für Instandhaltung usw.), Personal- und Energiekosten herangezogen. Ist eine Kostenreduzierung durch Vermarktung des Endproduktes oder Nutzung des Biogases möglich, werden diese als Erlöse dargestellt, gehen aber nicht mit in die jährlichen Kosten ein.

Bei herangezogenen Kostenfunktionen aus den USA werden die ermittelten Kosten aufgrund des momentanen Devisenkurses der beiden Währungen gleichgesetzt und in Euro angegeben. Als Umrechnungsfaktor von vietnamesischen Dong in EUR bzw. USD wurde der Durchschnittskurs von 2014, der bei 27.907 VND lag, angesetzt (OANDA 2014).

Investitionskosten

Investitionskosten teilen sich auf in Baukosten und die notwendigen Ausgaben für die mechanische und elektrische Ausrüstung der Schlammbehandlung (GHAZY 2011, ZESSNER & LAMPERT 2010). Auf Grundlage von Datenauswertungen konnten RUDOLPH & HARBACH (2010) sowie ZESSNER & LAMPERT (2010) belegen, dass die Baukosten unab-

hängig von der Größe der Schlammbehandlungsanlage sowie den ländertypischen Randbedingungen rund 65 % der Investitionskosten ausmachen. 35 % entfallen auf die mechanische und elektrische Ausrüstung (Verhältnis 70 % zu 30 %). Die Höhe der Baukosten hingegen ist abhängig von den Personalkosten und den Preisen für die verschiedenen Baumaterialien (ZESSNER & LAMPERT 2010). Eine Schwierigkeit stellt die Abschätzung des Verhältnisses dar, das laut ZESSNER & LAMPERT (2010) mit Personalkosten von 55 % und Materialkosten von 45 % gelöst werden kann.

RAWLINSON & SKALSKA-BURGESS (2013) haben eine Analyse über die internationalen Baukosten inklusive der Materialien und Personalkosten durchgeführt und festgestellt, dass die vietnamesischen Baukosten im Gegensatz zu den Baukosten in Deutschland und den USA durchschnittlich 40 % geringer ausfallen. Da die angesetzten Kostenfunktionen für die Berechnung der Kapitalkosten in dieser Fallstudie größtenteils auf Daten aus Deutschland und den USA basieren, ist für die Baukosten eine Kostenreduzierung von 40 % angesetzt worden. Auf eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Bauteile wird im Rahmen dieser Arbeit aus Kapazitätsgründen verzichtet, auch wenn dadurch eine detailliertere Kostenaufstellung möglich wäre.

Da ein Großteil der Maschinentechnik und der elektrischen Ausrüstung importiert wird und der Preis der Materialien sich am Weltmarkt orientiert (ZESSNER & LAMPERT 2010), wird hier lediglich eine Kostenreduzierung um 30 % vorgenommen.

Die jährlichen Kapitalkosten werden für die vorliegenden Schlammtechnologien nach der Annuitätenmethode errechnet. Die Kosten sind abhängig vom ermittelten Untersuchungszeitraum, der mit der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Schlammbehandlungsanlagen gleichzusetzen ist. Die durchschnittlichen Nutzungsdauern für Schlammbehandlungsanlagen, die von der LAWA (2005) aufgelistet werden, können für die Berechnung der jährlichen Kapitalkosten nicht ohne Anpassung übernommen werden. Dieses verdeutlichen die nachfolgenden Bilder von Kläranlagenkomponenten aus der Industriezone Tra Noc einige Jahre nach der Inbetriebnahme der Kläranlagen.

Die durchschnittlichen Nutzungsdauern der LAWA (2005) sowie TURK & KERN (2008), die in den Kostenvergleich eingehen, werden deshalb folgendermaßen reduziert:

- Baulicher Teil 50 %
- Maschineller Teil 50 %
- Elektrik 75 %.

Diese decken sich größtenteils mit den im Circular No.: 45/2013/TT-BTC vom 25. April 2013 enthaltenen Nutzungsdauern der vietnamesischen Regierung.



Abbildung 5-19: Kläranlagenbestandteile einige Jahre nach der Inbetriebnahme

Für die Wurmkompostierung konnten keine durchschnittlichen Nutzungsdauern in der Literatur gefunden werden. Da das Verfahren vergleichbar mit den natürlichen Schlammmentwässerungsanlagen ist, werden die Nutzungsdauer der LAWA (2005) mit den angegebenen Reduzierungen auch für die Wurmkompostierung angesetzt.

Für die Ermittlung der Kapitalkosten sind zudem die Zinsen relevant, die für die Finanzierung der Schlammbehandlungsanlagen erhoben werden müssen. Ausgehend von einem Realzinssatz für Vietnam aus dem Jahr 2013 von 5,36 % (THE GLOBAL ECONOMY 2013) und dem angepassten Abschreibungszeitraum lässt sich der Kapitalwiedergewinnungsfaktor entsprechend LAWA (2005) ermitteln.

Personalkosten

Als Teil der Betriebskosten sind die anfallenden jährlichen Personalkosten mit in den Kostenvergleich einzubeziehen. Die monatlichen Personalkosten eines einfachen Arbeiters in der Industriezone Tra Noc, der hauptsächlich zur Betreuung der Kläranlagen eingesetzt wird, liegt bei 2.000.000 VND (DTINews 22.01.2014, MIERKE 2012). Unter den Gesichtspunkten, dass die Region Can Tho einem weiteren Wirtschaftswachstum unterliegt, wird die Lohnentwicklung steigen (MIERKE 2012), weshalb für den Kostenvergleich ein monatliches Gehalt von 3.000.000 VND mit 100 % Arbeitszeit (6 Tage je 8 h) für das Personal der Schlammbehandlungsanlagen angesetzt wird.

Da bei vielen Prozessschritten auf Maschinenteknik verzichtet worden ist, sind bei der Kompostierung und der Wurmkompostierung 2 Personen für den Anlagenbetrieb notwendig. Trockenbeete hingegen können mit einer Person und 100 % Arbeitszeit betrieben werden (WANG et al. 2007b). Dies trifft auch für die anaerobe Klärschlammstabilisierung inklusive der KWKK zu, selbst, wenn bei weitgehend manueller Betriebsweise des Faulbehälters ein höherer Zeitaufwand berücksichtigt wird (DWA 1998). Für die Klärschlammvererdung ist laut KUHLENDahl & BREITHAUPT (2011) der Personalaufwand gering, weshalb eine Person mit einer Arbeitszeit von 25 % pro Monat angesetzt

wird. Die Betrachtung der Personalkosten bezieht sich ausschließlich auf die Schlammbehandlungsanlage ohne die Betreuung der Kläranlage zu berücksichtigen.

Energiekosten

Eine Abschätzung des Energiebedarfs ist im vorhergegangenen Kapitel 5.2 vorgenommen worden und geht in den Kostenvergleich ein. Der Strompreis in der Industriezone Tra Noc lag im Jahr 2013 bei 1.750 VND/kWh, die hier als Richtwert für die Energiekosten eingehen.

Der durchschnittliche Dieselpreis in Vietnam lag im Jahr 2012 laut WORLDBANK (2014a) bei 1,06 USD/L, der in den Kostenvergleich für den Radlader der Kompostierung eingeht.

Wartung und Instandhaltung

ZESSNER & LAMPERT (2010) setzen für die Wartungs- und Instandhaltungskosten eine Pauschale von 5 % der Investitionskosten an, die für die anaerobe Klärschlammstabilisierung, die Kompostierung und die Trockenbeete herangezogen wird. Für die Klärschlammvererdung werden von IPP CONSULT (2008) in Ägypten 600 €/1.000 (m²*a) angesetzt, die ebenso in diesen Kostenvergleich eingehen. Laut CARDOSO et al. (2008) sind die Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Wurmkompostierung gering, so dass bei der wenigen Maschinenteknik eine Pauschale von 5 % der Kapitalkosten als zu hoch angesehen und auf 2,5 % der Kapitalkosten reduziert wird.

Erlöse und Kostenreduzierung

Erlöse können durch die Vermarktung des Endproduktes erzielt werden und damit die jährlichen Kosten für die Behandlung und Verwertung des Klärschlammes reduzieren. Da keine praktischen Erfahrungen zur Vermarktung vorliegen, gehen die Erlöse nicht mit in den Kostenvergleich ein, werden aber gesondert aufgeführt.

Bei der Wurmkompostierung sind nach eigenen Recherchen und ARNOLD (2010) für den fertigen Wurmkompost bis zu 10.000 VND/kg als Erlös möglich. Für die Berechnung wurde vorerst ein geringerer Erlös von 5.000 VND/kg angesetzt. Zudem besteht die Möglichkeit die Kompostwürmer zu verkaufen, die im Mekong Delta 150.000 bis 200.000 VND/kg erzielt haben (ARNOLD 2010). Die Menge der zum Verkauf zur Verfügung stehenden Kompostwürmer kann zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden, weshalb dieser Erlös nicht in den Kostenvergleich einfließt.

Für das Endprodukt Kompost fand ARNOLD (2010) bei den örtlichen Landwirten Kilogrammpreise um die 1.000 VND, also deutlich geringer als die Erlöse für den Wurmkompost. Eine Vermarktung des fertigen Kompostes ist unter gewissen Gesichtspunkten umsetzbar. Hier wird auf das Beispiel der Region Da Lat verwiesen, die aufgrund des Blumen-, Gemüse- und Obstanbaus einen hohen Bedarf an organischen Düngern aufweist.

Für eine Vermarktung der Endprodukte sind laut SHIVAKUMAR et al. (2009) und ADORADA (2007) zusätzliche Kosten für Personal, Marketing, Verpackung, etc. anzusetzen. Diese Kosten fließen durch eine 20 %ige Reduzierung der errechneten Erlöse bei der Wurmkompostierung und Kompostierung in den Kostenvergleich ein.

Bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung kommen die Kostenreduzierungen durch die Erzeugung von Strom und Wärme bzw. Kälte in der Kombination BHKW und AdKM zu Stande. Der Strombedarf aus dem öffentlichen Netz wird aufgrund der Nutzung des erzeugten Stroms auf dem Firmengelände minimiert. Abhängig ist die KWKK von der Biogasproduktion für die momentan keine großtechnischen Erfahrungswerte vorliegen und die möglichen Kostenreduzierungen deshalb zwar aufgelistet, aber nicht in den Kostenvergleich eingehen. Der angesetzte Strompreis wird mit 1.750 VND/kWh angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass keine Wärmezufuhr zur Faulraumheizung notwendig ist. Somit entfallen die Kosten zur Wärmeerzeugung.

Erfahrungen zeigen, dass das Endprodukt aus der Trockenbeetentwässerung nicht für die Vermarktung geeignet ist. Die Klärschlammvererdung produziert zwar laut Literatur ein hochwertiges Endprodukt, aber bis jetzt liegen für dieses Verfahren in Vietnam keine praktischen Erfahrungen vor. Zudem ist eine Räumung der Vererdungsbeete alle 8-10 Jahre notwendig und kann selbst bei erfolgreicher Vermarktung des Endproduktes nicht in den Kostenvergleich aufgenommen werden. IPP CONSULT (2008) nehmen für Ägypten einen Erlös von 4-10 €/m³ für den vererdeten Klärschlamm an. Für Vietnam sind jedoch, und dies gilt auch für die anderen Technologievarianten, sozial-ökonomische Marktforschungen notwendig, um die Wirtschaftlichkeit der Vermarktung der Endprodukte zu erforschen. Zudem sollten Schulungen und Weiterbildungen für die Anwender vorgenommen werden, da diese mit dem Umgang organischer Düngemittel nicht oder nur wenig vertraut sind (IPP CONSULT 2008, WIENEKE 2005).

Transportkosten werden nicht berücksichtigt, denn hierfür liegen zu wenige Daten über die Verwertung der Endprodukte in Vietnam vor. Die Verpachtungspreise liegen zwischen 50-60 USD/m². Vorerst wird davon ausgegangen, dass auf dem Unternehmensgelände der Fallbeispiele genügend Platz vorhanden ist. Eine Bewertung des Flächenbedarfs wird im nachfolgenden Kapitel 6 vorgenommen.

Zu beachten ist bei dem Kostenvergleich, dass für die Technologievarianten der anaeroben Klärschlammstabilisierung, der Kompostierung und der Wurmkompostierung eine zusätzliche Entwässerungseinheit einzuplanen ist. Pauschal sind die Investitionssumme und die Jahreskosten der Trockenbeete eingeplant worden. Nachfolgend ist der Kostenvergleich für die fünf Technologievarianten mit den möglichen Kostenreduzierungen durch Erlöse oder Stromeinsparungen aufgelistet (Tabelle 5-15).

Tabelle 5-15: Kostenvergleich der Technologievarianten für das Fallbeispiel der Fischverarbeitung

	Einheit	Anaerobe Klärschlamm- stabilisierung	Kompostierung	Trockenbeete	Klärschlamm- vererdung	Wurm- kompostierung
Gesamtinvestition	[€]	2.085.266	56.279	27.612	42.103	29.675
Investition <i>Faulung</i> <i>Biogasnutzung</i> <i>Entwässerung</i>	[€/a]	265.810 9.735 9.132	10.954 9.132	3.347	4.980	3.510 9.132
Personalkosten	[€/a]	1.290	2.580	1.290	323	2.580
Energiekosten Diesel	[€/a]	1.158	549 22.410	123 2.991	123	
Wartung und Instand- haltung	[€/a]	101.911	2.814	1.381	1.692	742
Gesamt	[€/a]	389.036	48.439	9.132	7.118	15.964
Kostenreduzierung	[€/a]	-12.902	-11.279			-104.220

5.4 Empfehlung und Maßnahmen

Anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse sowie Erkenntnisse aus der Literatur werden nachfolgend Empfehlungen und Maßnahmen für die Planung und den Betrieb der Klärschlammbehandlungsanlagen abgeleitet. Dies gilt im Besonderen für die Klärschlammbehandlung unter den örtlichen Rahmenbedingungen der Industriezone Tra Noc sowie Vietnams.

Tabelle 5-16: Bau- und betriebstechnische Maßnahmen für die untersuchten Technologievarianten

Technologie	bautechnische Maßnahmen	betriebstechnische Maßnahmen
Kompostierung	<p>Überdachung der Nachrotte aufgrund der klimatischen Verhältnisse</p> <p>gute Zugänglichkeit zu den Mieten für Radlader gewährleisten</p> <p>ggf. anfallendes Sickerwasser sammeln und in die Kläranlage einleiten</p> <p>zur Reduzierung der Geruchsemissionen ggf. Abdeckung der Nachrotte notwendig</p> <p>vorzugsweise Rindenmulch als Strukturstoff verwenden</p> <p>staubförmige Emission eindämmen bei der Siebung</p>	<p>Verfügbarkeit der Strukturmaterialien prüfen</p> <p>Kokos nur bedingt als Strukturmaterial geeignet; Empfehlung Rindenmulch 70:30 Vol.-%</p> <p>regelmäßige Temperatur- und Wassergehaltskontrolle</p> <p>Befeuchtung und Umwälzen notwendig während Nachrotte</p> <p>C/N-Verhältnis 1:25 bis 1:40 bei Rindenmulch</p> <p>aufgrund der klimatischen Verhältnisse abhängig vom Substrat ggf. Verkürzung der Nachrotte möglich</p>
Wurmkompostierung	<p>Abdeckung der Beete zum Schutz der Kompostwürmer</p> <p>Reduzierung der Umlagerung durch den Einbau von Trennwänden (Abstand <1 m)</p> <p>für ggf. anfallendes Sickerwasser Drainage vorsehen</p> <p>Überdachung der Beete zum Schutz vor Niederschlag und Austrocknung des Substrates</p> <p>Aufstellung der Beete in Arbeitshöhe</p> <p>Planung einer Wasserleitung zur Befeuchtung der Beete in der Trockenzeit</p>	<p>Schichthöhe 20 cm</p> <p>Regelmäßige Kontrolle von Temperatur, pH-Wert und Wassergehalt</p> <p>ggf. in Trockenzeit Befeuchtung des Material notwendig</p> <p>Behandlungszeit stark abhängig vom Ausgangssubstrat (2-6 Wochen)</p> <p>1x pro Woche Auflockern des Wurmkompostes</p> <p>Kompostwürmer reagieren sensibel auf Substratänderungen; Adaptionszeit einplanen</p>
Trockenbeete	<p>Auslegung anhand der Trocknungszeit 10-15 d; abhängig vom Substrat</p> <p>gute Zugänglichkeit für den Radlader gewährleisten</p> <p>aufgrund der klimatischen Verhältnisse Überdachung planen</p> <p>Drucklose Beschickung</p>	<p>Batchbetrieb (Trocknungszeit und Räumung)</p> <p>Schichthöhe 30-50 cm</p> <p>Regelmäßiger Austausch der Drainageschichten</p>

Technologie	bautechnische Maßnahmen	betriebstechnische Maßnahmen
Klärschlammvererdung	<p>Auslegung der Vererdungsbeete mit Feststoffbelastungen bis zu $120 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})^1$</p> <p>frühzeitige Anpflanzung und Adaption der Schilfpflanzen</p> <p>Beschickungsphasen auf mehrere Beete aufteilen</p> <p>bei der Auslegung der Drainage die Regenzeit sowie Einstauvorrichtungen für die Trockenzeit bedenken</p> <p>Auswirkungen der Rückbelastung auf die Reinigungsstufen der Kläranlage beachten</p> <p>Drucklose Beschickung</p> <p>Zugänglichkeit für die Beeträumung gewährleisten</p>	<p>in Adaptionsphase der Schilfpflanzen vollständiger Einstau des Filterkörpers</p> <p>langsame Erhöhung der Feststoffbelastungen; Beschickung 2x wöchentlich</p> <p>regelmäßige Begutachtung und Anpassung der Beschickung an die Vitalität des Pflanzenbestandes (Trockenzeit/Regenzeit)</p> <p>aerober Schlamm unkritisch, bei Faulschlamm Durchlässigkeit des Filterkörpers beachten; ggf. Sauerstoffversorgung erhöhen</p> <p>regelmäßiger Beschnitt des Pflanzenbestandes, allerdings nicht zu kurz</p> <p>regelmäßige Analysen der Rückbelastung für einen stabilen Betrieb der Kläranlage</p>
Anaerobe Klärschlammstabilisierung	<p>Unter den klimatischen Verhältnissen bewährte Aufenthaltszeit von 15-17 d</p> <p>Umwälzung mit robustem Rührwerk</p> <p>Biogasnutzung festlegen; Alternative bei schwankender Stromversorgung oder für Kühlprozesse</p> <p>Eindick- und Entwässerungseinheit in das Prozessschema integrieren</p>	<p>Eindickung des Überschussschlammes auf TR 3-5 % notwendig</p> <p>Zulauf GV >50 %; ansonsten Optimierung der Kläranlage notwendig; Reduzierung des Schlammalters</p> <p>konstante Temperatur empfehlenswert; Absenkung der Prozesstemperatur auf 27-30°C möglich¹</p> <p>Faulschlamm nicht geeignet für direkten Einsatz in der Landwirtschaft</p>

¹weiterer Forschungsbedarf

Die Empfehlungen und Maßnahmen, die zur zukünftigen Gestaltung und Lenkung des Systems beitragen, beziehen sich nicht nur auf den bau- und betriebstechnischen Bereich, sondern auf alle erforderlichen Ressourcen (menschlich, sachlich, finanziell und zeitlich), die einzuhaltenden Rahmenbedingungen (gesetzliche, ökologische oder finanzielle) und die mit der Veränderung eintretenden Auswirkungen.

Bei allen untersuchten Technologievarianten ist eine Schulung des Personals zwingend erforderlich. Zudem sind Monitoringprogramme für einen stabilen Prozessablauf gemeinsam mit dem Personal zu erarbeiten. Besonders wichtig bei der Kompostierung sowie der Wurmkompostierung sind die potenziellen Absatzmärkte sowie deren Verbraucher. Diese müssen die Endprodukte akzeptieren und eine Einweisung in die landwirtschaftliche Ausbringung bekommen. Zudem sind alle Endprodukte regelmäßig auf die Schwermetallkonzentration zu überprüfen. Aufgrund der Produktionsschwankungen in den Industriebetrieben können Überschreitungen der Schwermetallgrenzwerte im Endprodukt aufkommen.

Die hier untersuchten Technologien sind im Kleinmaßstab durchgeführt worden. Da in Vietnam und im Südostasiatischen Raum bisher nur wenige Betriebserfahrungen von Pilot- und Demonstrationsanlagen vorliegen (WORLDBANK 2013, KOOTTATEP et al. 2004b), sind hinsichtlich großtechnischer Umsetzungen unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen weitere Versuchsreihen der Technologien im Pilot- und Demonstrationsmaßstab zu empfehlen.

6 Bewertung der Technologievarianten

Ziel der Bewertung ist es aus den Alternativen und den Technologievarianten die am besten Geeignete hinsichtlich der Nachhaltigkeitskriterien und der Bedürfnisse der Interessensgruppen auszuwählen.

Soll die Entscheidung für eine Alternative im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung getroffen werden, muss hier festgehalten werden, dass Nachhaltigkeit keinen fixen Zielzustand darstellt (SCHUH 2001). Es gibt demnach keine allgemeingültige, für alle Situationen gleiche Definition einer nachhaltigen Entwicklung, hierzu existieren zu viele regionale und örtliche Unterschiede hinsichtlich natürlicher Ressourcen, kultureller Einstellungen und Ressourcennutzung (SCHUH 2001). Bei der Erstellung eines nachhaltigen Klärschlammkonzeptes liegt ein multidimensionales Zielsystem mit mehreren Umweltzuständen vor, dessen Alternativen anhand eines multikriteriellen Entscheidungsverfahrens ausgewählt werden sollen.

SCHUH (2001) analysierte zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung verschiedene multikriterielle Entscheidungsverfahren. Als Ergebnis ist die Nutzwertanalyse als vorteilhafteste Methode für die nachhaltige Entwicklung zu sehen.

Die Nutzwertanalyse zwingt alle beteiligten Interessensgruppen die Ziele klar zu definieren, stellt die Ziele damit auf eine rationale Basis und ermöglicht eine sachliche Diskussion unter den Interessensgruppen. Zudem werden komplexe, multidimensionale Entscheidungssituationen in überschaubare Teilsituationen zerlegt und erleichtern dadurch ein rationales Entscheiden (BECHMANN 1978).

6.1 Zielsystem und Gewichtung der Indikatoren

Das Zielsystem für die Nutzwertanalyse ist in den vorhergegangenen Kapiteln dieser Arbeit nach und nach für das vorliegende Fallbeispiel der Fischverarbeitung in der Industriezone Tra Noc aufgestellt und durch Gliederung sowie Ordnung der Zielkriterien entwickelt worden. Es dient als Basis für die Nutzwertanalyse und zur unterstützenden Umsetzung einer Alternative unter den aufgestellten Zielkriterien. Durch die Untergliederung und eine immer größer werdende Genauigkeit durch die Situationsanalyse konnten Indikatoren aufgestellt werden, die als Hilfsmittel für die quantitative Erfassung der Systemzustände dienen (FACH 2013, RESSEL 2004).

Für die Bewertung im Rahmen der Nutzwertanalyse muss jedem Indikator ein subjektiver Zielwert oder Teilnutzwert, üblicherweise durch den Entscheidungsträger, zugeordnet werden, der die relative Stellung des Indikators im Vergleich zu den übrigen Indikatoren ausdrückt (RESSEL 2004). Danach wird festgelegt, welchen Teilnutzwert die jeweilige Alternative bezüglich des nachhaltigen Klärschlammkonzeptes erreicht, diese Quantifizierung erfolgt durch die rationale Wertsynthese (FACH 2013, RESSEL 2004).

Es existieren für die messende Bewertung drei unterschiedliche Skalierungen, für die die Eigenschaften Identität, Rangordnung und Additivität maßgebend sind (ZANGEMEISTER 1976):

- Nominalskalen
- Ordinalskalen
- Kardinalskalen (Intervall- und Verhältnisskalen).

Die zu wählende Skalierungsmethode ist für den Einzelfall auszuwählen. Für das Klärschlammkonzept wird die Verhältnisskalierung durch die Methode der sukzessiven Vergleiche als geeignet eingestuft. Durch die gesteuerte Ermittlung von nutzenabhängigen Kriteriengewichten kann die hier vorliegende Situation gut quantifiziert und abgebildet werden. Nach ZANGEMEISTER (1976) erfolgt der sukzessive Vergleich zur Kriteriengewichtung in vier Schritten:

1. Die Zielkriterien und Indikatoren k_i werden in eine ordinale Präferenzordnung gebracht, so dass man beispielsweise für die Gewichte $g_i = PR(k_i)$ folgende Aussage erhält:

$$g_1 > g_2 > \dots > g_i > \dots > g_m \quad (6-1)$$

2. Das am höchsten eingestufte Zielkriterium erhält provisorisch den Wert 1,0. Den übrigen Zielkriterien werden dann entsprechend niedrigere Werte zugeordnet, so dass die Präferenzordnung nach Formel 6-1 erfüllt ist.
3. Es werden sukzessive die numerisch zugeordneten Gewichte g_i , $i = 1$ (1) m einzeln jeweils mit der Summe der benachbarten Gewichte verglichen. Dabei kann g_i größer, kleiner oder gleich dieser Summe eingeschätzt werden. Falls das ursprünglich zugeordnete Gewicht dieser Einschätzung nicht entspricht, müssen entweder g_i selbst oder die benachbarten Gewichte der betrachteten Teilsumme korrigiert werden.
4. Sind sämtliche Gewichte entsprechend Schritt 3 überprüft und gegebenenfalls korrigiert worden, muss eine Normierung der Zielkriterien und Indikatoren vorgenommen werden, deren Summe eins ergibt:

$$g_i = g_i \left(1 / \sum_{i=1}^m g_i \right) \quad (6-2)$$

Ist das Zielsystem hierarchisch aufgebaut, können im praktischen Vorgehen zunächst jeweils die zum Oberziel (Knotenpunkt) direkt gehörenden Unterziele gewichtet werden (ZANGEMEISTER 1976). Damit bleibt der sukzessive Vergleich einfach sowie übersichtlich und die Anzahl der zu vergleichenden Gewichte bleibt klein (RESSEL 2004).

Der sukzessive Vergleich wurde mit den Entscheidungsträgern der Fischverarbeitung (Management und Betreiber) gemeinsam während der Interviews vorgenommen. Die

übrigen Interessensgruppen konnten nicht für ein Interview gewonnen werden, so dass hier exemplarisch für die zwei interviewten Interessensgruppen eine Gewichtung vorgenommen wurde. Eine allgemeingültige Präferenzstruktur steht nicht zur Verfügung, da die Bewertung und Gewichtung grundsätzlich durch die Entscheidungspersonen selbst vorgenommen wird (RESSEL 2004). Das Ergebnis ist in Tabelle 6-1 zusammen mit der angesetzten Wertsynthese dargestellt.

6.2 Wertsynthese

Der Gewichtung der Zielkriterien und Indikatoren folgt die Wertsynthese von ordinalen Präferenzordnungen, für die vier Regeln (Copeland-Regel, Austin-Slight-Regel, Thurstone-Regel, Rangordnungssummenregel) hergeleitet worden sind. Die ersten drei bestimmen zunächst Vorzugshäufigkeiten aus denen der Nutzwert bestimmt wird (ZANGEMEISTER 1976). Als Alternative zu den Vorzugshäufigkeiten kann die Rangordnungssummenregel angewendet werden, bei der die zugeordneten Rangplätze direkt summiert und die Rangsumme (Resultat) als Nutzwert definiert wird (RESSEL 2004, ZANGEMEISTER 1976).

Nach ZANGEMEISTER (1976) führen alle vier Regeln zum gleichen Ergebnis. Da die Rangordnungssummenregel sehr operational ist und sich in der Praxis bewährt hat, wird diese Regel zur Wertsynthese herangezogen.

Um die Nutzwerte der Alternativen nach der Rangordnungssummenregel zu berechnen, addiert man einfach zeilenweise die Ränge der Zielwertmatrix (ZANGEMEISTER 1976):

$$N_h = \sum_{i=1}^m R_{hi}^+; h = 1(1)n \quad (6-3)$$

Dies ermöglicht die vollständige Bewertung der Alternativen, impliziert aber, dass die Nutzendistanzen zwischen benachbarten Rängen gleich groß sind.

Tabelle 6-3 zeigt das aufgestellte Zielsystem mit den Gewichtungen sowie die Ränge der Zielwertmatrix.

Tabelle 6-1: Gewichtung und Bewertung der Indikatoren des Zielsystem zur Nutzwertanalyse

Nachhaltiges Klärschlammkonzept für Industriezonen																						
Effektivität	Beeinträchtigung			Zuverlässigkeit			Verwertung		Flexibilität			Betrieb			Kosten		Ressourcen		Bildungsstand		Umsetzung	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Stabilisierungsgrad	Reduzierung MO	Rückbelastung	Geruch	Emissionen	Überflutungs-sicherheit	Klima-/Temperatureinfluss	Qualität	Düngewert	Produktions-schwankungen	Platzbedarf	Anlagen-größe	Bauweise	Maschinen-technik	Arbeitsaufwand	jährliche Kosten	Nutzungsdauer	Einsparungen	Energiebedarf	Komplexität	Schulungsbedarf	Akzeptanz	Integration
100%																						
20%							12,50%							30%							25%	
10%			10%			8%			6,25%			12,50%			15%			15%			12,50%	
5%	5%	4%	3%	3%	3%	5%	2,25%	2,25%	2,5%	1,25%	2,5%	1,25%	3%	2%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	6,25%	6,25%	6,25%	6,25%
Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1
voll < 50 %; Rottegrad IV/V	<10 ³	Klasse B erfüllt	nicht zu erwarten	gering bzw. Nutzung	keine baulichen Anpassungen	positiv	Abklär V/ BioAbfV erfüllt	hoch	flexibel	niedrig < 1.000 m ²	flexibel	einfach	einfach	niedrig ≤ 1 Pers.	niedrig	kurz < 6 Jahren	hoch	niedrig	niedrig < 2	niedrig	hoch	hoch
Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2
teil 50-65 %; Rottegrad II/III	10 ³	teilweise erfüllt	[-]	mittel	geringe	positiv und negativ	teilweise erfüllt	mittel	[-]	mittel 1.000-2.000 m ²	[-]	mittel	mittel	mittel 2-3 Pers.	mittel	mittel 6-10 Jahre	niedrig	mittel	mittel 2	mittel	mittel	mittel
Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3
nicht > 65%; Rottegrad I	>10 ³	nicht erfüllt	zu erwarten	hohe	große	negativ	nicht erfüllt	gering	nicht flexibel	hoch > 2.000 m ²	nicht flexibel	komplex	komplex	hoch > 3 Pers.	hoch	lang > 10 Jahre	keine	hoch	hoch > 2	hoch	niedrig	hoch

6.3 Berechnung des Nutzwertes

Die Berechnung des Nutzwertes wird mit Hilfe der Rangordnungssummenregel vorgenommen, nachdem die Zielkriterien und deren Indikatoren aufgestellt und gewichtet worden sind. Die Indikatoren unterteilen sich in weitere Teilnutzwerte, die folgendermaßen bewertet werden:

Rang 1	gut
Rang 2	befriedigend
Rang 3	schlecht.

Die Zielgewichte g_i werden unter der Voraussetzung der gleich großen Nutzendistanzen der benachbarten Ränge mit den ermittelten Rängen multipliziert. Anschließend werden die Produkte der Teilnutzwerte zum Nutzwert addiert.

Im Fallbeispiel der Fischverarbeitung werden die Technologievarianten miteinander verglichen und deren Nutzwert gebildet. Die Entscheidung hinsichtlich einer zentralen oder dezentralen Klärschlammbehandlung und -verwertung wurde bereits vorab von den Entscheidungsträgern der Fischverarbeitung getroffen, die sich für die Alternative 2, dezentrale Behandlung und Verwertung, entschieden haben. Hierbei ist zu beachten, dass zum Zeitpunkt des Interviews noch keine zentrale Lösung zur Behandlung und Verwertung der anfallenden Industrieklärschlämme bestand. Das Zentralklärwerk wurde noch nicht betrieben und zudem war keine Klärschlammbehandlung geplant. Aufgrund der dargelegten Einflüsse der Akteure in der Industriezone Tra Noc könnte dem Management der Fischverarbeitung eine zentrale Klärschlammbehandlung und -verwertung verpflichtend durch CIPCO auferlegen werden, so dass keine Wahlmöglichkeit zwischen den Alternativen für die Industriebetriebe der Fallstudie bestünde.

Darüber hinaus ist die Erfahrung in Bezug auf die Klärschlammverwertung in Vietnam praktisch null. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf durch Marktforschung, Interviews mit Landwirten, Schulungen und praktische Vorversuche, bevor eine nachhaltige Bewertung inklusive der Klärschlammverwertung und -entsorgung vorgenommen werden kann. Nach einer gründlichen Datenerhebung, die den Rahmen dieser Arbeit überschreitet, ist das aufgestellte Zielsystem lediglich an die Alternativen inklusive Verwertung anzupassen und ggf. zu erweitern.

Um dennoch eine Aussage über die verschiedenen Alternativen für die Industriezone Tra Noc treffen zu können, wird im Kapitel 7.1 eine Anpassung an die übrigen Fallbeispiele, teils auf Grundlage von weiteren Interviews, teils aufgrund von Rückschlüssen aus der Situationsanalyse und Literaturwerten vorgenommen.

Für das Fallbeispiel der Fischverarbeitung wird die Technologievariante, Anaerobe Klärschlammstabilisierung, trotz des vorherigen Ausschlusses für die dezentrale Behand-

lung bewertet. Ausschlaggebend sind die positive Energiebilanz und die Möglichkeit für mittlere bis kleine Unternehmen, Mini-BHKWs in Kombination mit AdKM wirtschaftlich zu betreiben. Tabelle 6-3 stellt die Teil- sowie Nutzwerte für die verschiedenen Technologievarianten für die Fischverarbeitung dar.

Der bestmögliche Nutzwert beträgt rechnerisch $N_{\text{BEST}} = 1$, während der schlechteste Nutzwert $N_{\text{WORST}} = 3$ beträgt.

Als beste Technologievariante kann demnach die Wurmkompostierung mit einem Nutzwert $N_{\text{WURM}} = 1,46$ bewertet werden. Es folgen die Klärschlammvererdung und die Trockenbeete, die hinsichtlich der Nutzwerte dicht aneinander liegen.

Tabelle 6-2 fasst die Ergebnisse der letzten Kapitel zum Vergleich der Technologievarianten zusammen.

Tabelle 6-2: Vergleich ausgewählter Indikatoren für die Technologievarianten

	Einheit	Anaerobe Klärschlammstabilisierung	Kompostierung	Trockenbeete	Klärschlammvererdung	Wurmkompostierung
Spezif. Energieverbrauch	[kWh/t TR]	54	5 130	7 99	15	7
<i>Strom</i>						
<i>Diesel</i>						
Energiegewinn	[kWh/a]	78.690 88.688 59.125	-	-	-	-
<i>Strom</i>						
<i>Kälte</i>						
<i>Wärme</i>						
Jährliche Kosten	[€/a]	389.036	48.439	9.132	7.117	15.964
Einsparungen	[€/a]	12.902	11.279	-	-	104.220
Nutzwert	[-]	2,27	1,82	1,89	1,62	1,46

Die Wurmkompostierung ist für Industrieländer, wie Deutschland, neu und wird für die Klärschlammbehandlung nur selten angewendet. Unter Berücksichtigung, dass eine Anpassung des Zielsystems für Unternehmen in Industrieländern vorgenommen werden muss, erscheint die Wurmkompostierung dennoch als ein Verfahren, dass für kleine bis mittlere Unternehmen, auch in Industrieländern, eine gute Alternative zu den üblichen Behandlungstechnologien darstellt.

Tabelle 6-3: Nutzwertberechnung für die verschiedenen Technologievarianten

Systemvariante			Anaerobe Klärschlammstabilisierung		Kompostierung		Trockenbeete		Klärschlammvererdung		Wurmkompostierung	
Kriterien	Gewichtung		Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert
Gesundheit und Hygiene	%	%										
Effektivität	10											
1 Stabilsierungsgrad		5	3	0,150	1	0,050	1	0,050	1	0,050	1	0,050
2 Reduzierung der pathogenen Mikroorganismen		5	3	0,150	1	0,050	2	0,100	1	0,050	1	0,050
Beeinträchtigung	10											
3 Rückbelastung		4	3	0,120	1	0,040	3	0,120	3	0,120	1	0,040
4 Geruch		3	3	0,090	1	0,030	3	0,090	3	0,090	1	0,030
5 Emission		3	1	0,030	3	0,090	2	0,060	1	0,030	1	0,030
Umwelt und natürliche Ressourcen												
Zuverlässigkeit	8											
6 Überflutungssicher		3	3	0,090	3	0,090	1	0,030	1	0,030	2	0,060
7 Klima/Temperatureinfluss		5	1	0,050	1	0,050	1	0,050	2	0,100	2	0,100
Verwertung	4,5											
8 Qualität Schwermetalle		2,25	2	0,045	1	0,023	1	0,023	1	0,023	1	0,023
9 Düngewert		2,25	2	0,045	1	0,023	2	0,045	2	0,045	3	0,068
Technologie und Betrieb												
Flexibilität	6,25											
10 Produktionsschwankungen		2,5	3	0,075	1	0,025	1	0,025	1	0,025	1	0,025
11 Platzbedarf		1,25	1	0,013	3	0,038	3	0,038	3	0,038	2	0,025
12 Anlagengröße		2,5	2	0,050	1	0,025	1	0,025	1	0,025	3	0,075
Betrieb	6,25											
13 Bauweise		1,25	3	0,038	2	0,025	1	0,013	1	0,013	1	0,013
14 Maschinenteknik		3	3	0,090	2	0,060	2	0,060	2	0,060	1	0,030
15 Arbeitsaufwand		3	2	0,060	3	0,090	2	0,060	1	0,030	3	0,090
Finanzielle und ökonomische Kriterien												
Kosten	15											
16 jährliche Kosten		7,5	3	0,225	2	0,150	1	0,075	1	0,075	2	0,150
17 Nutzungsdauer		7,5	2	0,150	3	0,225	1	0,075	1	0,075	1	0,075
Ressourcen	15											
18 Einsparungen (€/a)		7,5	2	0,150	1	0,075	3	0,225	3	0,225	1	0,075
19 Energiebedarf		7,5	2	0,150	3	0,225	3	0,225	1	0,075	1	0,075
Soziale und kulturelle Kriterien												
Bildungsstand	12,5											
20 Komplexität der Technologievariante		6,25	3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	2	0,125
21 Schulungsbedarf		6,25	3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	1	0,063
Umsetzung	12,5											
22 Akzeptanz der Technologie		6,25	1	0,063	1	0,063	3	0,188	2	0,125	1	0,063
23 Integration Behörden/Partei		6,25	1	0,063	2	0,125	3	0,188	3	0,188	2	0,125
Auswertung												
Nutzwert				2,27		1,82		1,89		1,62		1,46

6.4 Verifizierung der Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse

Auf Basis der bereits beschriebenen Rahmenbedingungen der Industriezone Tra Noc und der bis jetzt erarbeiteten Ergebnisse werden die anderen in Kapitel 3.3 beschriebenen Fallbeispiele unter Verwendung des aufgestellten Zielsystems bewertet. Hierdurch wird die Anwendbarkeit der ausgewählten Indikatoren hinsichtlich der Technologievarianten verifiziert.

6.4.1 Bewertung der Fallbeispiele

Die Indikatoren **Zuverlässigkeit**, **Flexibilität** und **Bildungsstand** bleiben unter konstanten Rahmenbedingungen in der Industriezone Tra Noc in ihrer Rangzuordnung unverändert. Hingegen mussten die Ränge der Kriterien, die sich aus den Messdaten der durchgeführten Versuchsreihen ergeben, angepasst werden. Dies trifft auf die **Indikatoren Effektivität**, **Verwertung** und **Ressourcen** zu.

Bei den Indikatoren Beeinträchtigung, Betrieb und Kosten sind die Unterpunkte Rückbelastung, Arbeitsaufwand und jährliche Kosten abhängig von der zu behandelnden Klärschlammqualität und -quantität, weshalb eine Angleichung der Ränge für die Fallbeispiele Chitosanherstellung, Brauerei und Zentralklärwerk vorgenommen wurde. Das soziale und kulturelle Kriterium **Umsetzung**, bei dem es um die Akzeptanz und die Integration der Technologie geht, wird stark von den an der Entscheidung beteiligten Akteuren beeinflusst. Die Industrieunternehmen, CIPCO und die Behörden geben somit faktisch die Rangordnung vor. Diese kann, muss aber nicht zwingend bei den anderen Fallbeispielen verändert werden.

Bei der Auswahl der Technologievarianten und der Gewichtung der Indikatoren durch den sukzessiven Vergleich musste für den Chitosanhersteller keine Veränderung vorgenommen werden.

Im Fall der Brauerei hingegen wird bereits eine Bandfilterpresse zur Entwässerung des anfallenden Klärschlammes betrieben. Weshalb auf Wunsch des Managements nur die Technologievarianten betrachtet wurden, bei denen die Bandfilterpresse als ein Behandlungsschritt integriert werden kann. Relevant für die Nutzwertanalyse der Brauerei waren demnach die Technologievarianten Anaerobe Klärschlammstabilisierung, Kompostierung und Wurmkompostierung. Durch die Betriebserfahrungen mit der Bandfilterpresse wurde die Gewichtung der Indikatoren Effektivität, Beeinträchtigung, Zuverlässigkeit und Verwertung beim sukzessiven Vergleich reduziert. Dafür bekamen die Indikatoren Flexibilität und Betrieb eine stärkere Gewichtung zugewiesen.

Beim Zentralklärwerk gab es keine Einschränkungen in Bezug auf die einzusetzende Technologie, so dass eine Nutzwertanalyse für alle ausgewählten Technologievarianten durchgeführt wurde. Auf dem Zentralklärwerksgelände steht für die Klärschlammbe-

handlung nur eine geringe Fläche zur Verfügung, weshalb der Unterpunkt Platzbedarf im Vergleich zu den anderen Fallbeispielen deutlich stärker gewichtet wurde. Folglich tritt eine Veränderung der Indikatorenengewichtung ein.

Abbildung 6-1 stellt die Ergebnisse der Nutzwertanalyse für die Fischverarbeitung denen der Chitosanherstellung, der Brauerei und dem Zentralklärwerk gegenüber. Die detaillierten Nutzwertanalysen mit den entsprechenden Gewichtungen und Rangzuordnungen sind im Anhang zu finden.

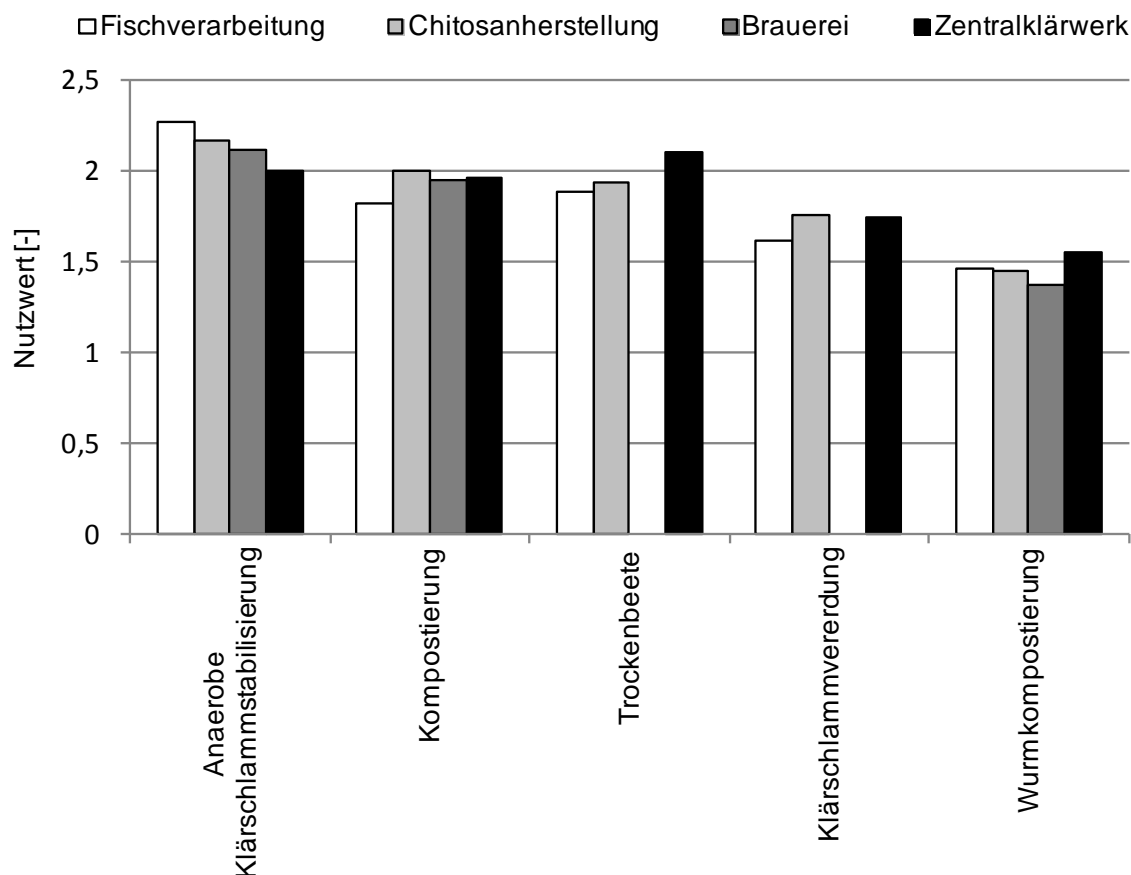


Abbildung 6-1: Nutzwertvergleich der ausgewählten Technologievarianten der Fallbeispiele

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Nutzwert für die anaerobe Klärschlammstabilisierung mit steigender Anlagengröße sinkt und sich dem Nutzwert der Trockenbeete angleicht bzw. einen niedrigeren Nutzwert erreicht. Der Nutzwert der Wurmkompostierung hingegen erhöht sich mit wachsender Anlagengröße. Die Kompostierung erreicht bei der Fischverarbeitung einen geringeren Nutzwert und wird damit vor den Trockenbeeten eingestuft.

6.4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Korrekturverfahren, das die Auswirkungen der Veränderung einer Eingangsgröße (Gewichtung) auf den Nutzwert misst (HOFFMEISTER 2008). Aufgrund des subjektiven Charakters der Nutzwertanalyse ist eine Sensitivitätsanalyse zwingend erforderlich. Dabei wird die Gewichtung der Indikatoren geprüft, indem sie verändert und die Auswirkung auf den Nutzwert ermittelt wird.

Um möglichst sichtbare Auswirkungen bei der Ermittlung der Nutzwerte zu erhalten, werden nach FACH (2013) die größten und kleinsten Gewichte vertauscht. Die Vorgehensweise der Autorin wird wie folgt übernommen:

- Gewichtung durch den sukzessiven Vergleich (Referenz)
- Tausch der größten und der geringsten Gewichtung
Kosten ↔ Verwertung
- Tausch der zweitgrößten und zweitkleinsten Gewichtung
Bildungsstand ↔ Flexibilität
- Gleiche Gewichtung aller Indikatoren.

Abbildung 6-2 zeigt die Nutzwerte bei Veränderung der Indikatorgewichtung.

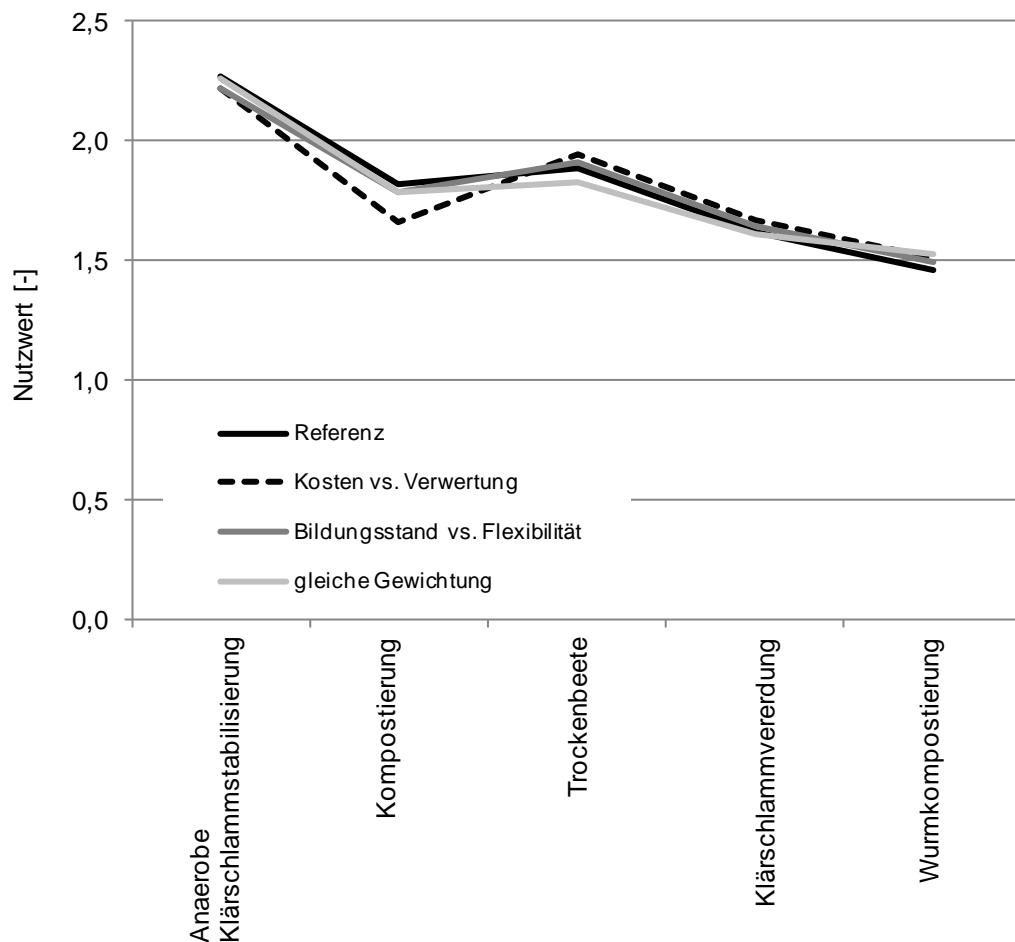


Abbildung 6-2: Sensitivitätsanalyse mit Varianten der Indikatorgewichtung

Es wird deutlich, dass trotz Veränderung der Indikatorgewichtung die Wurmkompostierung die geeignetste Technologievariante für das Fallbeispiel der Fischverarbeitung bleibt.

Die Kompostierung bekommt einen deutlich geringeren Nutzwert durch den Tausch der Gewichtung Kosten ↔ Verwertung. Der Indikator Kosten hat die höchste Gewichtung für das Fallbeispiel bekommen und wirkt bei der Kompostierung als Ausschlusskriterium. Ansonsten bleibt die Rangfolge der Technologievarianten auch bei Veränderung der Indikatorgewichtung gleich:

Wurmkompostierung>Klärschlammvererdung>Kompostierung>Trockenbeete>Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Es wurde durch die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass die Wurmkompostierung für die Fischverarbeitung die beste und die anaerobe Klärschlammstabilisierung die ungeeignetste Lösung darstellt. Dies lässt sich aufgrund der Ergebnisse der Verifizierung auch auf die anderen Fallbeispiele in der Industriezone übertragen. Auch wenn die anaerobe Klärschlammstabilisierung erfahrungsgemäß mit steigender Anschlussgröße wirtschaftlicher betrieben werden kann und Mini-BHKWs eine ökonomische Lösung für kleine und mittlere Anlagen darstellen, fehlen in Vietnam und der Industriezone Tra Noc gegenwärtig sowohl die Betriebserfahrungen als auch ausgebildetes Fachpersonal für diese Technologievariante. Aufgrund der derzeitigen Situation ist eine anaerobe Klärschlammstabilisierung deshalb nicht zu empfehlen.

Die Wurmkompostierung ist unter den Rahmenbedingungen in der Industriezone Tra Noc demnach eine nachhaltige Technologievariante, die sich an die unterschiedlichen Industriezweige und Ziele der Interessensgruppen anpassen lässt.

7 Alternativenauswahl der Fallbeispiele

Die Nutzwertanalyse dient als Hilfsmittel, um die Entscheidung für eine Alternative auf einer rationalen Basis treffen zu können. Transparenz und Nachhaltigkeit der Technologievarianten werden abgebildet und unterstützen die Entscheidungsträger bei der Auswahl einer Alternative. Für die Industriezone Tra Noc und die vorgestellten Fallbeispiele sind drei Alternativen erarbeitet und vorgestellt worden, die nachfolgend auf Grundlage der Ergebnisse diskutiert werden sollen.

7.1 Auswahl einer Alternative

In Vietnam, wie durch die Situations- und Akteursanalyse belegt, werden Entscheidungen häufig nicht rational, sondern durch die kommunistische Partei oder deren verlängerten Arm, die Volkskomitees, getroffen. Hinzu kommen die immer strikter werdenden gesetzlichen Vorgaben, vorerst für die Abwasserreinigung der Industriezonen, in absehbarer Zeit aber vermutlich auch für die Klärschlammbehandlung. Demzufolge wird die Umsetzung von dezentralen Lösungen immer schwieriger. Schon jetzt ist für jede vietnamesische Industriezone ein Zentralklärwirk verpflichtend, so dass für das **Zentralklärwerk** in der Industriezone Tra Noc die **Alternative 1 (zentral)** politisch vorgeschrieben ist. Da aber vorerst eine geregelte Abwasserreinigung und die Gebührenfindung im Vordergrund stehen, zählt die Klärschlammproblematik nicht zu den Prioritäten des Industriezoneninvestors CIPCO.

Aus diesem Grund sind die Unternehmen der Industriezone Tra Noc vorerst weiterhin selbst für die Klärschlammbehandlung und -entsorgung verantwortlich und die **Alternative 3 (zentrale Verwertung)** kann **vorläufig** noch **nicht realisiert** werden. Dennoch hat sich der **Chitosanhersteller** im Interview für diese Alternative ausgesprochen. Gründe seinerseits sind das Fehlen von ausgebildetem Personal, bevorzugte Nutzung der freien Fläche für die Trocknung der Shrimpschalen und die Reduzierung der Entsorgungskosten. Steht nämlich eine zentrale Lösung für die Industriezone Tra Noc zur Verfügung, kann dieses ein Vorteil für die Industrieunternehmen sein. Eine durch Gebühren finanzierte zentrale Klärschlammbehandlung kann kostentechnisch günstiger zu betreiben sein. Hinzu kommt die bei der Kompostierung und Wurmkompostierung vorteilhafte gemeinsame Vermarktung der Endprodukte (Kompost und Wurmkompost). Diese kann für ein kleines bis mittelständiges Unternehmen aufwendig, personalintensiv und kostspielig sein. Es darf in keinem Fall nur der reine Gewinn durch den Verkauf der Endprodukte, ohne die finanziellen Aufwendungen für das Personal, Marketing, Verpackung und Transport, betrachtet werden.

Ein weiterer Vorteil der Alternativen 1 und 3 liegt darin, dass alternative Verwertungswege einfacher gewährleistet werden können. So wäre es z. B. möglich den produzierten Wurmkompost verpackt an Kleinbauern zu verkaufen und gleichzeitig

Wurmkompost direkt auf den umliegenden Obstwiesen auszubringen, wenn dessen Qualität dies zulässt. Durch mehrere Verwertungsmöglichkeiten wird eine größere Entsorgungssicherheit geschaffen, falls es zu einem Ausfall des üblichen Verwertungsweges oder zum Mehrabsatz der produzierten Endprodukte kommt.

Die **Brauerei** betreibt mit ihrer Bandfilterpresse eine der wenigen Anlagen zur Schlammbehandlung in der Industriezone Tra Noc. Demnach bietet sich hier die **Alternative 2 (dezentral)** an. Aus eigenen Untersuchungen ist bekannt, dass der entwässerte Schlamm sich ebenso für eine Wurmkompostierung eignet, wie der flüssige Überschussschlamm. Die Wurmkompostierung könnte demnach gut an die Entwässerung durch die Bandfilterpresse angeschlossen werden. Eine Verwertung fehlt allerdings und der derzeitige Entsorgungsweg ist nicht bekannt. Für die Vermarktung der eher geringen Wurmkompostmengen bieten sich die umliegenden Klein- und Obstbauern an, die aufgrund der kurzen Transportwege gut zu erreichen wären.

Die **Alternative 2 (dezentral)** ist auch für den **Fischverarbeitungsbetrieb** geeignet. Wichtig ist allerdings eine Technologievariante zu wählen, die flexibel auf Produktionsschwankungen der Fischindustrie reagieren kann. Da derzeit keine Klärschlammbehandlung auf dem Gelände existiert, ist die Auslegung und Umsetzung in die Zukunft gerichtet. Die Wurmkompostierung hat sich in der vorher durchgeführten Nutzwertanalyse als eine geeignete Technologievariante herausgestellt. Aufgrund der aktuell fehlenden Entwässerung des anfallenden Klärschlammes, ist dieser Behandlungsschritt in das Verfahrensschema zu integrieren. Im nachfolgenden Kapitel ist exemplarisch eine Wurmkompostierungsanlage für den Fischverarbeitungsbetrieb in der Industriezone ausgelegt worden.

7.2 Exemplarische Auslegung und Umsetzung der Alternative

Die Abwasserreinigungsanlage des Fischverarbeitungsbetriebes hat einen täglichen Zufluss von 700 m³/d und produziert 769 kg TS. Bei den üblichen Feststoffanteilen im Überschussschlamm von 3-5 % entspricht das einer Schlammmenge von 15.380-25.633 kg/d. Nach Abzug des Überschussschlammes folgt demnach als erster Behandlungsschritt die Entwässerung. Zum einen, da sonst die anfallende Klärschlammmenge für den Fischverarbeitungsbetrieb nicht zu bewältigen wäre und die Entsorgungskosten steigen würden, zum anderen da die Kompostwürmer einen Wassergehalt von 80-90 % bevorzugen. Ob die Entwässerung in Trockenbeeten, durch Bandfilterpressen oder Dekanter erfolgt (siehe Abbildung 7-1), liegt im Ermessen des Investors. Trockenbeete sind eine kostengünstige Lösung im Vergleich zu den Entwässerungsaggregaten. Die gemeinschaftliche Nutzungen von Aggregaten innerhalb der Industriezone Tra Noc, z. B. der Bandfilterpresse der Brauerei, wäre ebenfalls eine zu betrachtende Möglichkeit zur Klärschlammmentwässerung.



Foto (rechts): Heinrich (2014)

Abbildung 7-1: Unterschiedliche Aggregate zur Klärschlammmentwässerung (Bandfilterpresse und Dekanter) in Vietnam

Hier werden exemplarisch überdachte Trockenbeete nach SPERLING et al. (2005b) ausgelegt. Bei einer Flächenbeschickung von 15 kg/m^2 wird eine Trockenbeetfläche von 1.128 m^2 benötigt, die bei einer Trocknungszeit von 15 d und 5 d Beeträumung auf 12 Beete á 96 m^2 (z. B. $12 \times 8 \text{ m}$) verteilt werden. Nach der Trocknung des Klärschlammes (Annahme 20 % TR) folgt die Räumung der Trockenbeete mit anschließender Befüllung der Wurmkompostierungsanlage, die nach einem Auslegungsbeispiel von CARDOSO et al. (2008) geplant wurde.

Der getrocknete Klärschlamm wird händisch in die dafür vorgesehenen überdachten Wurmbeete gefüllt. Um den getrockneten Klärschlamm mit einer Schichthöhe von 20 cm in den Wurmbeeten zu verteilen, werden 7 Wurmbeete ($20 \times 1 \text{ m}$) pro Woche benötigt. Bei einer angesetzten Behandlungszeit von 4 Wochen entspricht das 28 Beeten plus 2 Beeten für die Räumung. Diese werden kontinuierlich mit dem getrockneten Klärschlamm beschickt. Nach 4 Wochen wird nach CARDOSO et al. (2008) eine zweite Schicht Wurmkompost aufgetragen. Da die Kompostwürmer epedaphisch sind, also in der Streuschicht leben, verlassen sie die erste Schicht aus fertigem Wurmkompost und wandern in die obere „Streuschicht“ aus frischem Wurmkompost. Diese kann dann abgetragen und in ein neues Wurmbeet gefüllt werden.

Bei den eigenen Versuchsreihen konnten zwei Weiterentwicklungen in die von CARDOSO et al. (2008) geplante Wurmkompostierungsanlage integriert werden. Um nicht ständig den Wurmkompost umfüllen zu müssen, wurde bei den eigenen Versuchsreihen eine bewegliche Trennwand zwischen dem bereits bearbeiteten und dem frischen Wurmkompost eingebaut (siehe Abbildung 7-2). Wenn die Kompostwürmer nicht mehr als einen Meter zurücklegen müssen, wandern sie selbstständig vom bearbeiteten in den frischen Wurmkompost und ein händisches Umfüllen entfällt. Zusätzlich ist eine luftdurchlässige Abdeckung, beispielsweise feinmaschiger Maschendraht, zum Schutz

der Würmer vor Vögeln, Eidechsen und anderen Tieren auf den Wurmbeeten anzubringen.



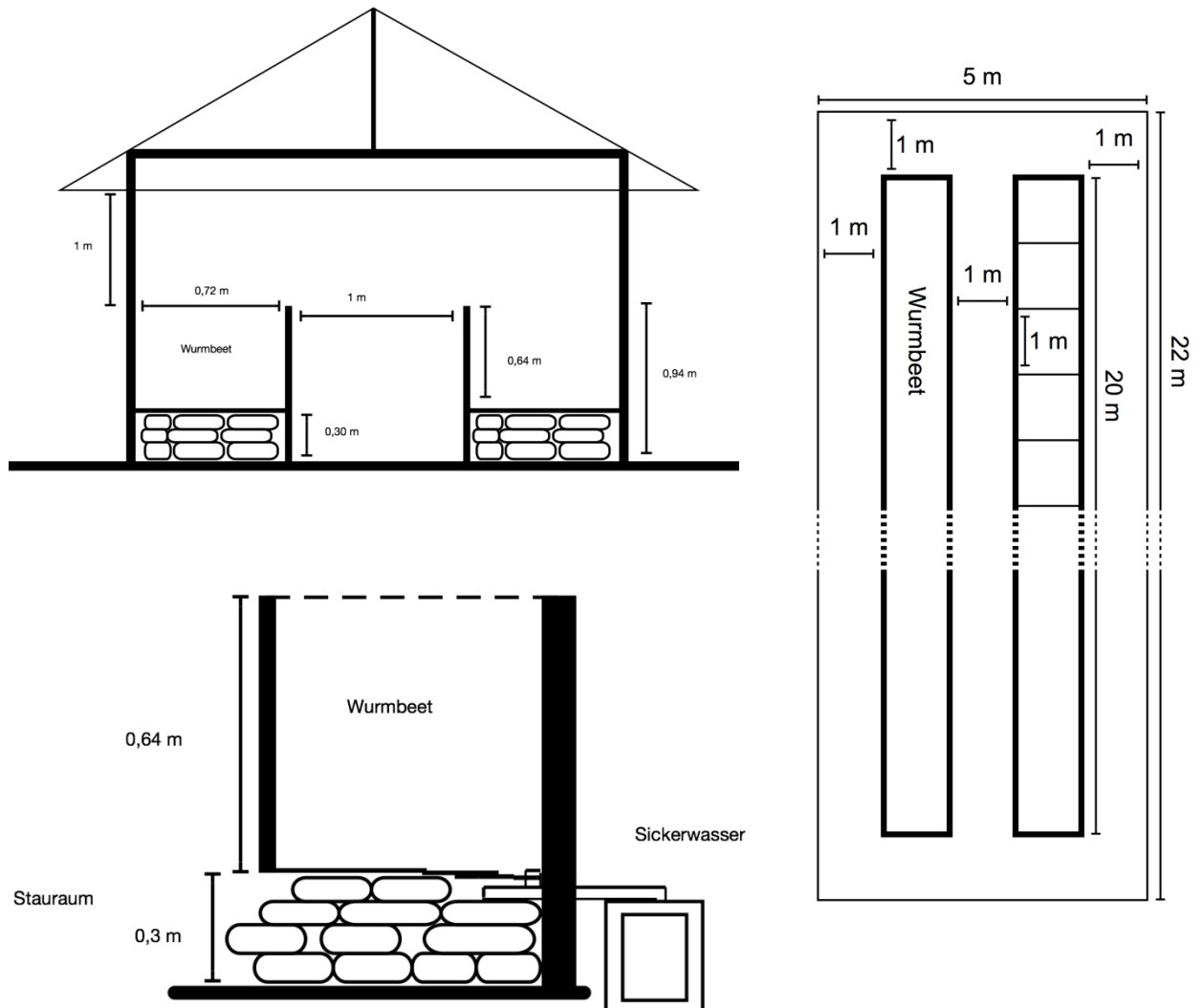
Foto (rechts): Vogt (2012)

Abbildung 7-2: Trockenbeete auf der Kläranlage in Bac Ninh und Wurmbeet mit eingebauter Trennwand zwischen frischem und fertigem Wurmkompost

Die Wurmbeete sind mit einem Drainagesystem ausgestattet, das ein leichtes Gefälle zu einer Seite aufweist, um das möglicherweise anfallende Sickerwasser in entsprechenden Behältern aufzufangen. Abbildung 7-3 zeigt die veränderte Wurmkompostierungsanlage nach CARDOSO et al. (2008).

SHAMMAS & WANG (2008) empfehlen für die Auslegung von Klärschlammbehandlungsanlagen einen Sicherheitsfaktor, damit ein zuverlässiger Betrieb garantiert werden kann. Eine hohe Betriebssicherheit wird allerdings auch durch die Planung von parallelen Anlagenteilen, gut ausgebildetem Wartungspersonal, genügend Schlamm Lagerungsfläche und alternativen Verwertungsoptionen gewährleistet. Was die Notwendigkeit einer ausreichenden Schulung und Einarbeitung des Personals zum einwandfreien Betrieb der Anlagen nochmals unterstreicht.

Die Planungs- und Auslegungsphase sollte allerdings nicht als letzter Schritt der Umsetzungsphase angesehen werden. Für den Anlagenbetrieb ist eine ausführliche technische Dokumentation der Anlagenteile mit Kontaktdaten der zuständigen Firmen hilfreich, zudem ist für eine Prozessüberwachung und -kontrolle ein festes Monitoringprogramm aufzustellen, in das das verantwortliche Personal eingearbeitet werden muss (KLINGEL et al. 2002). Hier ist Hilfestellung durch betriebs erfahrene Wissenschaftler und Ingenieure unabdingbar. Diese muss allerdings aufgrund des akuten Fachpersonal mangels aus dem Ausland bezogen werden.



Quelle verändert nach CARDOSO et al. (2008)

Abbildung 7-3: Wurmkompostierungsanlage für die Fischverarbeitung

8 Übertragbarkeit des Konzeptes

Eine Übertragung des methodischen Vorgehens auf andere Fallbeispiele mit Klärschlammbezug ist grundsätzlich möglich. Die unterschiedlichen Anwendungsgrenzen des Konzeptes werden im Folgenden genauer erläutert.

8.1 Anwendungsgrenzen

In Vietnam hat die kommunistische Partei einen zentralen Stellenwert und damit Einfluss auf die wesentlichen Lebensbereiche der vietnamesischen Bevölkerung. Mit Gesetzen und Normen wird zwar versucht, einen verbindlichen gesetzlichen Handlungsrahmen zu schaffen, aber die Korruption und politische Einflussnahmen außerhalb des Sichtfelds der Öffentlichkeit weichen diesen immer wieder auf. Politische Entscheidungen sind in solchen Fällen weder aus ökonomischer noch ökologischer Sicht nachvollziehbar bzw. legitim. Hier kommt die entworfene Methodik an Grenzen, da sie nicht auf rationale Handlungsmuster stößt, sondern auf politisch bedingte Entscheidungen, die aufbauend auf Bestechungsgeldern und Verwandtschafts- oder Machtverhältnissen getroffen werden. Eine Einbeziehung der Industrieunternehmen oder gar Beschäftigten und ihrer jeweiligen Interessen entfällt hier gänzlich.

Als gegenwärtiges Beispiel für Vietnam sei die Gesetzgebung für die Zentralität und Dezentralität von Abwasserreinigungsanlagen einander gegenüber gestellt. Das für vietnamesische Industriezonen geltende Gesetz hinsichtlich von Zentralkläranlagen bezieht sich momentan lediglich auf die Abwasserreinigung. Aber bereits hier wird ein Tarifsystem ausgearbeitet, das alle Industrieunternehmen zu einem Anschluss ans zentrale Kanalnetz zwingt. Die Möglichkeit der dezentralen Abwasserreinigung und damit verbunden der dezentralen Klärschlammbehandlung wird somit für die Industrieunternehmen in nächster Zeit vollständig entfallen; selbst wenn verschiedene Studien gezeigt haben, dass dezentrale bzw. semizentrale Alternativen mitunter Vorteile, wie einen geringen Investitionsbedarf, mit sich bringen (DRÜCKER 2009, FACH 2013).

Grundsatzvoraussetzung, um die Problematik und die negativen Umweltauswirkungen erkennen zu können, ist das Umweltbewusstsein bei der Regierung und der Bevölkerung. Keiner der beiden Gruppen erkennt aktuell die Notwendigkeit entscheidend zu handeln. Eine Gesetzgebung hinsichtlich der Klärschlammbehandlung und -entsorgung existiert im geringen Maße und die Bevölkerung entsorgt wissentlich Abfall, Abwasser sowie Klärschlamm in der Umwelt. Für eine nachhaltige Umsetzung der Alternativen ist die Unterstützung beider Akteursgruppen gefordert. Ist diese nicht vorhanden, kann die Methodik zwar angewendet werden, die Chancen für eine nachhaltige Umsetzung sind jedoch eher gering.

Damit ist es allerdings noch nicht getan. Fehlendes Basiswissen und Verständnis für die existierenden Behandlungstechnologien oder Verwertungsmöglichkeiten kann bei der

Anwendung des Klärschlammkonzeptes zu einer eingeschränkten Betrachtung der tatsächlichen Situation führen. Geeignete Technologievarianten werden in Folge dessen beispielsweise aus der Betrachtung ausgeschlossen, Verwertungswege nicht ausreichend auf ihre Umsetzung untersucht. Ohne die Unterstützung von fachlich kompetenten Akteuren, seien es Wissenschaftler, Ingenieure, Entwicklungshilfeorganisationen oder Fachpersonal aus dem In- oder Ausland, ist auch durch eine Anwendung des erarbeiteten Klärschlammkonzeptes, eine Umsetzung der Alternativen zur Klärschlammbehandlung nicht zu erwarten.

Dazu kommt, besonders in Entwicklungsländern, die fehlende Erprobung der Technologien unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen und fehlende Erfahrung im Umgang mit Industrieklärschlamm. In dieser Arbeit wurden fünf Technologien im Kleinmaßstab unter den Rahmenbedingungen in Vietnam getestet. Für eine Realisierung der Ansätze im Pilotmaßstab sowie mögliche Verfahrenskombinationen besteht noch weiterer Forschungsbedarf, unter anderem damit eine nachfolgende Umsetzung im Großmaßstab realisiert und Komplikationen (z. B. kein Betrieb der Faulung auf der Kläranlage Yen So, Hanoi) vermieden werden können. Eine detaillierte Datengrundlage ist hier zwingend erforderlich. Zudem sollten die weiterführenden Untersuchungen auf nicht biologisch abbaubare Klärschlämme erweitert werden. In Vietnam liegen nur wenige bis keine Forschungsergebnisse zur Behandlung und Verwertung dieser Klärschlämme vor, obwohl sie einen erheblichen Anteil an der Gesamtmenge aufweisen.

8.2 Umsetzungsmöglichkeiten

In der Industriezone Tra Noc ist für verschiedene Fallbeispiele ein Klärschlammkonzept erstellt worden. Die äußeren Rahmenbedingungen sind zwar für die Fallbeispiele in der Industriezone Tra Noc identisch, doch führte die Untersuchung der einzelnen Fallbeispiele zu einer notwendigen Anpassungen in Bezug auf Alternativen, Technologievarianten und ihre Bewertung. Dies verdeutlicht, dass eine reine Betrachtung von der Makroebene nicht zielführend ist. Erst eine sorgfältige Analyse auf der Mikroebene ermöglicht eine vollständige Situationserfassung, die zu einer nachhaltigen Entscheidungsfindung in der Klärschlammproblematik führen kann.

Mit einer Entscheidungsfindung ist es jedoch nicht getan. Es folgt die Umsetzungsphase. Investoren müssen gefunden, ingenieurstechnische Planungen durchgeführt, Bau-firmen engagiert und entsprechende Genehmigungen bei den lokalen Behörden eingeholt werden. Gerade in dieser Phase ist vor Ort in Vietnam Unterstützung notwendig. Zur Schulung des Personals, der Aufstellung des Monitoringprogramms sowie der Einstellung der Prozessparameter in der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung ist betriebstechnische Erfahrung notwendig. Für eine nachhaltige Umsetzung des Konzeptes sind neben der theoretischen Methodik deshalb auch Fachkräfte einzubeziehen, die in Vietnam gegenwärtig fehlen. Es besteht Forschungsbedarf, wie ohne die Autorität

der vietnamesischen Entscheidungsträger Fachkräfte bei der Anwendung des Konzeptes und der anschließenden Umsetzung der Klärschlammbehandlungsanlagen mitwirken können.

Die Herausforderung einer Klärschlammbehandlung ist nicht alleine auf Vietnam beschränkt. Auch in anderen Entwicklungs- sowie in Industrieländern sind Entscheidungen in Hinblick auf eine nachhaltige Behandlung von Klärschlämmen zu treffen. In Südostasien herrscht in vielen Ländern in Bezug auf die Umweltbelastung eine ähnliche Ausgangssituation, wie in Vietnam. Die schnell wachsende Wirtschaft führt dazu, dass die Infrastruktur nicht Schritt halten kann und gerade Bereiche wie die Abwasserbehandlungstechnik erst zu einem späteren Zeitpunkt nachgebessert werden. Dies sind genau die Einsatzbereiche für das erarbeitete Klärschlammkonzept. Die ausgewählten Alternativen zeigen wirtschaftliche, auch für Entwicklungsländer finanzierbare Möglichkeiten zur Klärschlammbehandlung und damit zur Minderung der negativen Umweltauswirkungen auf. Der Einsatz im Bereich der Industriezonen kann demnach nur ein erster Schritt sein. Weitere Studien über eine flächendeckende Anwendung im kommunalen Bereich sind notwendig. Die durchzuführenden Untersuchungen sind speziell auf die Weiterentwicklung der Technologievarianten für den Einsatz in Entwicklungsländern auszurichten.

Für die Übertragung des Konzeptes auf Industrieländer sind andere Zielkriterien notwendig. Die Nachhaltigkeitskriterien nach SuSANA (2008) gelten auch für Industrieländer und sollten nicht verändert werden. Die Zielkriterien hingegen sind durch eine Situationsanalyse neu zu erfassen und abzuändern. Es existieren in Industrieländern bereits Erfahrungen hinsichtlich der Technologien zur Klärschlammbehandlung, zudem stehen verschiedene Verwertungswege zur Wahl. Änderungen von Gesetzen und Verordnungen führen aber auch in Industrieländern dazu, dass die bestehende industrielle sowie kommunale Klärschlammbehandlung angepasst werden muss.

In Deutschland ist der Referentenentwurf zur Novellierung der Klärschlammverordnung vom 18.08.2015 maßgeblich. In dessen Rahmen sollen nicht nur striktere Grenzwerte für Schwermetalle und organische Schadstoffe verabschiedet werden, sondern auch eine ab dem 1. Januar 2025 verpflichtende Rückgewinnung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors. Diese Änderungen der Klärschlammverordnung führen zu einer Erschwerung der landwirtschaftlichen Verwertung; momentane Prozessabläufe müssen um neue Behandlungsschritte zur Phosphorrückgewinnung und Einhaltung der neuen Grenzwerte erweitert werden. Damit sind die für eine rationale Entscheidung notwendigen Indikatoren des Konzeptes auf die neue gesetzliche Situation zu übertragen. Aspekte, wie die einfache Bauweise, wenig Maschinentechnik und eine geringe Anzahl an Prozessschritten, die in Vietnam wichtig für die Umsetzung sind, rücken damit in den Hintergrund. Die neu zu erreichenden Behandlungsziele hingegen gewinnen in Deutschland an Bedeutung.

Mit der Verabschiedung der neuen Klärschlammverordnung wird es eine Neuordnung der umsetzbaren Alternativen für die Behandlung und Verwertung durch Industrieunternehmen, aber auch Kommunen, geben. In Deutschland wird deshalb zukünftig eine Anwendung des Klärschlammkonzeptes zur Anpassung an die neuen Behandlungsziele immer bedeutender.

In diesem Zusammenhang wird der in Industrieländern ebenfalls vorherrschende politische Einfluss auf die Klärschlammbehandlung und die umsetzbaren Verwertungsmöglichkeiten deutlich. Politischer Druck kann demnach positiv genutzt werden, um sozial, ökologisch und ökonomisch sinnvoll erarbeitete Behandlungskonzepte für Industrieklärschlämme durchzusetzen.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Vorgehensweise aufgestellt, die es ermöglicht, ein angepasstes und nachhaltiges Konzept für Industriezonen in Entwicklungs- und Schwellenländern hinsichtlich der Klärschlammbehandlung und -verwertung zu ermitteln. Als Grundlage zur Entwicklung von Alternativen diente eine Situationsanalyse, die die klimatischen, sozioökonomischen, ökologischen, technischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen vor Ort analysiert sowie eine Akteursanalyse, die die beteiligten Akteure und deren Interessen identifiziert. Mit den Ergebnissen dieser Analysen können für den jeweiligen Standort geeignete Technologievarianten für die Behandlung, Verwertung und Entsorgung der anfallenden Industrieklärschlämme ausgewählt werden.

Als Basis zur Erarbeitung eines nachhaltigen Klärschlammbehandlungskonzeptes diente die momentane Situation der Industriezonen in Vietnam. Die fehlende Klärschlammbehandlung und -entsorgung stellt in den Industriezonen Vietnams eines der vorherrschenden Umweltprobleme dar. Es wurde sowohl eine Situationsanalyse als auch eine Akteursanalyse durchgeführt. Für die Auswahl geeigneter Technologievarianten für die Behandlung, Verwertung und Entsorgung der anfallenden Industrieklärschlämme wurden vor Ort in Vietnam Industrieklärschlämme charakterisiert und deren Anfall und Entstehung identifiziert. Ebenso wurde die Vereinbarkeit der in Betracht gezogenen Technologievarianten mit den in Vietnam vorherrschenden Rahmenbedingungen überprüft.

Die Problematik in Entwicklungsländern besteht in der geringen Erfahrung im Bereich der Klärschlammbehandlung und -verwertung sowohl kommunal als auch industriell. Dementsprechend ist die Datengrundlage gering oder gar nicht vorhanden, wie dies auch in Vietnam der Fall war. Das Abwasserbehandlungssystem befindet sich momentan im Aufbau. Dies ist jedoch nur durch ausländische Ingenieursleistungen zu realisieren, da in Vietnam die spezifischen Ingenieurserfahrungen zum Bau und Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen nicht vorhanden sind. Unter anderem aus kostentechnischen Gründen, aber auch aufgrund der geringen Erfahrungen in der Siedlungswasserwirtschaft, wird in den meisten Fällen auf eine Klärschlammbehandlung verzichtet. Betriebserfahrungen und bautechnische Grundlagen für die Klärschlammbehandlung und -verwertung sind weder bei Betreibern, Landwirten und Ingenieuren noch beim Management oder bei den Akademikern vorhanden.

Zur Anpassung und Überprüfung des entwickelten Klärschlammbehandlungskonzeptes und zur Konkretisierung der Vorgehensweise für die Umsetzung des Konzeptes wurde eine Fallstudie in der Industriezone Tra Noc in Can Tho, Vietnam, realisiert. Zunächst wurden für die Fallstudie die Rahmenbedingungen der Industriezone definiert und mit den aufgestellten, für Vietnam gültigen Zielkriterien für das Klärschlammkonzept verglichen. Dies dient als Basis für die Entwicklung von Indikatoren, die unter Beachtung der

Nachhaltigkeitskriterien (Gesundheit und Hygiene, Umwelt und natürliche Ressourcen, Technologie und Betrieb, finanzielle und ökonomische Kriterien, sozioökonomische und institutionelle Kriterien) aus der Schnittmenge der Technologieanpassungen und Rahmenbedingungen abgeleitet wurden. Nachfolgend sind die für ein nachhaltiges Klärschlammbehandlungskonzept wichtigen Indikatoren nochmals aufgelistet:

- Effektivität
- Beeinträchtigung
- Zuverlässigkeit
- Verwertung
- Flexibilität
- Betrieb
- Kosten
- Ressourcen
- Bildungsstand
- Umsetzung

Im Industriebereich liegen produktionsbedingt sehr unterschiedliche Abwasserströme vor, die die Qualität und Quantität der anfallenden Industrieklärschlämme maßgeblich beeinflussen. Zudem haben Management und Betreiber der Industriebetriebe oft unterschiedliche Vorstellungen in Bezug auf die Klärschlammbehandlung und -entsorgung, weshalb vier verschiedene Fallbeispiele (Fischverarbeitung, Chitosanherstellung, Brauerei und Zentralkläwerk) in der Industriezone ausgewählt wurden. Die Industrieunternehmen produzieren nicht nur verschiedene Produkte im Lebensmittelbereich, die zu unterschiedlichen Klärschlammqualitäten führen, sondern weichen auch in ihrer technischen Ausrüstungen sowie den Vorstellungen zur Behandlung (zentral/dezentral) voneinander ab.

Nach Berechnung der Klärschlammmengen, Charakterisierung der Industrieklärschlämme sowie Untersuchung der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen wurde für die ausgewählten Technologievarianten eine Stoffstromanalyse durchgeführt. Hierfür wurden vor Ort Untersuchungsreihen mit den ausgewählten Technologien Kompostierung, Wurmkompostierung, Trockenbeete, Klärschlammvererdung und anaerobe Klärschlammstabilisierung durchgeführt. Stoffstromanalysen tragen zum tieferen Verständnis des vorliegenden Systems bei und ermöglichen die Betrachtung von ganzheitlichen Zusammenhängen, weshalb Nährstoff-, Schwermetall- und Energiebilanzen erstellt wurden.

Auf Basis der entwickelten Indikatoren, der Situationsanalyse und der eigenen Untersuchungen wurden die ausgewählten Behandlungstechnologien bewertet und für die untersuchten Fallbeispiele geeignete Alternativen ausgewählt. Besonderes Augenmerk lag auf dem Kostenvergleich der Technologien, da anhand der Situationsanalyse Kosten als wichtigster Entscheidungsfaktor identifiziert worden waren. Die Akteursanalyse verdeutlichte den hohen Einfluss der kommunistischen Partei, die auch durch zuständige Provinzbehörden und durch das Industriezonenmanagement in Entscheidungen bezüglich des Klärschlammkonzeptes eingreift. Als zweitwichtigste Indikatoren stellten sich der Bildungsstand und die Umsetzung der Technologievariante dar. Der Begriff Umsetzung

umfasst hierbei auch, die Integration der Behörden und die Akzeptanz der Technologie im Industrieunternehmen.

Um Fachfremde, Entscheidungsträger, Behörden sowie Betreiber im Entscheidungsprozess zu unterstützen, wurde eine Bewertung unter Anwendung der Nutzwertanalyse vorgenommen. Durch diese können alle Interessensgruppen in das Entscheidungsverfahren integriert werden. Zu beachten ist dabei, dass die Gewichtung der Indikatoren standortspezifisch ist und gemeinsam mit den Interessensgruppen festgelegt werden muss. Zudem können Alternativen und Technologievarianten je nach Standort wegfallen, ausgetauscht oder ergänzt werden. Im Fallbeispiel der Fischverarbeitung wurde die Gewichtung der Indikatoren mit Management und Betreibern abgesprochen. Ebenso wurde vorab festgelegt, dass eine dezentrale Behandlung/Entsorgung favorisiert wird.

Als beste Technologievariante für das Fallbeispiel der Fischverarbeitung konnte die Wurmkompostierung ermittelt werden. Dies ist eine Technologie, die in Asien sehr weit verbreitet ist. Überzeugt hat die Wurmkompostierung durch die geringen Kosten, die hohe Akzeptanz und die einfache Bau- und Betriebsführung. Zudem kann das qualitativ hochwertige Endprodukt in Vietnam gut vermarktet werden. Durch die Bioakkumulation in den Kompostwürmern werden dem Kompostmaterial Schwermetalle und Chemikalien entzogen. Zur Verwendung in der Landwirtschaft liegen keine Erfahrungen vor, hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Durch die Verifizierung der Vorgehensweise zur Erstellung eines nachhaltigen Klärschlammkonzeptes anhand der anderen Fallbeispiele aus der Industriezone Tra Noc konnte nachgewiesen werden, dass eine Übertragung der Konzepterstellung auf andere Rahmenbedingungen möglich ist. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass auch Industrieländer von dem nachhaltigen Klärschlammkonzept profitieren können, besonders unter der Beachtung der Wurmkompostierung als einer möglichen Technologievariante. Obwohl Wurmkompostierung in Industrieländern bis zum heutigen Zeitpunkt kaum verbreitet ist, könnte die Klärschlammbehandlung in Industrieländern davon profitieren, weil das Verfahren wenig Energie benötigt, die Kompostwürmer Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm reduzieren und dadurch ein verwertbares Endprodukt mit hoher Qualität entsteht.

Als Anwendungsgrenzen der aufgestellten Vorgehensweise für ein nachhaltiges Klärschlammkonzept haben sich insbesondere das fehlende Umweltbewusstsein und die politische Situation herausgestellt, denn dadurch resultiert eine mangelnde und durch Korruption missachtete Gesetzgebung.

Insgesamt kann man festhalten, dass die in dieser Arbeit erarbeitete Methodik für die Aufstellung eines nachhaltigen Klärschlammkonzeptes für Industriezonen sich in den untersuchten Fallbeispielen bewährt hat und eine gute Übertragbarkeit gezeigt hat. Un-erlässlich für eine erfolgreiche Anwendung des entwickelten Konzeptes ist dabei, dass

die einzelnen Schritte (Situationsanalyse, Akteursanalyse, Gewichtung der entsprechenden Indikatoren, Nutzwertanalyse) beachtet werden und eine sorgfältige Bestandsaufnahme der technischen Eingangsdaten (Berechnung der Klärschlamm-mengen, Charakterisierung der Industrieklärschlämme, Untersuchung der Verwertungs- und Entsorgungsoptionen) erfolgt. Mit Hilfe des entwickelten Klärschlammkonzeptes kann somit ein wichtiger Beitrag auf dem Weg zu einem verbesserten Schutz von Mensch, Umwelt und Ressourcen geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- ABFKLÄRV (2012): Klärschlammverordnung – BGB 1 I S. 912, 1992.
- AD HOC (2014): Was ist ein Konzept und wie werden Konzepte entwickelt? Ad Hoc PERSONAL- UND ORGANISATIONSBERATUNG GMBH, HRSG., Luzern, Download unter http://www.adhoc-beratung.ch/PDF_Files/4-Seminare/Grundlagen,WasisteinKonzept.pdf. (20.08.2014).
- ADORADA, J. (2007): Assessment of Vermicomposting as a Waste Management Technology and a Livelihood Alternative in the Philippines. *Journal of Environmental Science and Management* 10, (2), 28–39.
- AMLINGER, F., PEYR, S. (2003): Umweltrelevanz der dezentralen Kompostierung – Klima-relevante Gasemissionen, flüssige Emissionen, Massenbilanzen, Hygienisierungsleistung. (14.08.2014).
- AMLINGER, F., PEYR, S., HILDEBRANDT, U., MÜSKEN, J., CUHLS, C., CLEMENS, J. (2005): Stand der Technik der Kompostierung - Grundlagenstudie, Download unter http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/greentec/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-biotechnisch/richtlinie_sdt/SdT_Grundlagenstudie-1-/SdT_Grundlagenstudie%5B1%5D.pdf. (25.06.2014).
- AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (2004): Klärschlammverordnung mit Schilf, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
- ANH, P. (2010): Mitigation water pollution in Vietnamese aquaculture production and processing industry – The case of pangasius and shrimp. Dissertation, Wageningen University, Wageningen.
- ARNOLD, U. (2010): Options for reuse of nutrients from waste water in the Mekong Delta, Vietnam, Institut für Nutzpflanzenwissenschaft und Ressourcenschutz, Bonn.
- ASEAN (2014): Clean Air for Smaller Cities in the ASEAN Region – Road Map Towards a Clean Air Plan for Can Tho, Vietnam, Download unter <http://www.citiesforcleanair.org/wp-content/uploads/2014/09/road-map-can-tho-finalised.pdf>. (01.03.2015).
- ASIAN DEVELOPMENT BANK (2010): Viet Nam Water and Sanitation Sector Assessment Strategy and Roadmap, Download unter <http://www.wastewatervietnam.org/images/201006.ADB.VN%20WaterSanitation%20AssessmentStrategyRoadmap.pdf>. (03.08.2014).
- AUSWÄRTIGES AMT (2014): Vietnam, Download unter http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Laender/Laenderinfos/01-Nodes_Uebersichtsseiten/Vietnam_node.html. (01.08.2014).

- BABSON, D. M., BELLMAN, K. (2013): Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility. *Biomass and bioenergy* : JBB 56, 493–505.
- BACCINI, P., BRUNNER, P. (2012): *Metabolism of the anthroposphere – analysis, evaluation, design*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- BACH, L. (2004): Anaerobic treatment of sugar and dye-industry wastewaters using an upflow anaerobic sludge-blanket process. Dissertation, Kumamoto University, Kumamoto.
- BASRAWI, F., YAMADA, T., NAKANISHI, K. (2010): Effect of Ambient Temperature on the Energy Balance of Anaerobic Digestion Plants. *Journal of Environment and Engineering* 5, (3), 526–538.
- BAUERFELD, K. (2012): Einfluss klimatischer Randbedingungen auf die Klärschlammbehandlung, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- BAUMANN, P., ROTH, M. (2008): Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen – systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials ; Leitfaden, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Landesverband Baden-Württemberg, Stuttgart.
- BECHMANN, A. (1978): *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*, Haupt-Verlag, Bern.
- BECKER, M., ASCH, F., CHIEM, N., VI, D., SALEH, E., TANH, K., TINH, T. (2008): Decomposition of Organic Substrates and their Effect on Mungbean Growth in Two Soils of the Mekong Delta. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 109, (1), 95–108.
- BECK-FRIIS, B., SMARS, S., JÖNNSSON, H., KIRCHMANN, H. (2001): Gaseous Emissions of Carbon Dioxide, Ammonia and Nitrous Oxide from Organic Household Waste in a Compost Reactor under different Temperature Regimes. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78, (4), 423–430.
- BERNSDORF, S., TAUCHNITZ, S., LIEMEN, F., MEIßNER, R. (2008): Abfall - Klärschlamm - Eignung von Klärschlammkompost als Rekultivierungsmaterial im Landschaftsbau. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* ; Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V 55, (12), 1323–1328.
- BGK (1998): *Methodenhandbuch zur Analyse von Kompost*, Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart.

- BIDLINGMAIER, W., BICKEL, F. (1980): Untersuchung aerober Stabilisierungsverfahren zur Schlammverrottung, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Eggenstein-Leopoldshafen.
- BIDLINGMAIER, W., GOTTSCHALL, R. (2000): Biologische Abfallverwertung, Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- BIOABFV (1998): Bioabfallverordnung – Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden.
- BISCHOF, F. (2008): Angepasste Technologien für internationale Märkte. GERMAN WATER PARTNERSHIP, HRSG., DOWNLOAD UNTER http://www.oth-aw.de/fileadmin/user_upload/Professoren/Bischof/angepasste_technologien_bf_komp_neu.pdf. (07.07.2014).
- BISCHOFBERGER, W. (2005): Anaerobtechnik, Springer, Berlin.
- BÖHNKE, B. (1979): Behandlung industrieller Abwässer in Entwicklungsländern, Aachen.
- BOLZONELLA, D., PAVAN, P. (2005): Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process biochemistry : incorporating biochemical engineering ; food, brewing and distilling, sewage and effluent treatment, pharmaceuticals* 40, (3-4), 1453–1460.
- BORAH, C., MAHANTA, P., KAKOTY, S., SAHA, U., SAHASRABUDHE, A. (2007): Study of quality parameters in vermicomposting. *Indian Journal of Biotechnology* 6, 410–413.
- BREU, M., DOBBS, R., REMES, J., SKILLING, D., JINWOOK, K. (2012): Sustaining Vietnam's growth: The productivity challenge, Download unter <http://www.mckinsey.com/search.aspx?q=Sustaining+Vietnam%E2%80%99s+growth%3A+The+productivity+challenge>. (01.08.2014).
- BRUNO, J., ORTEGA-LÓPEZ, V., CORONAS, A. (2009): Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. *Applied Energy* 86, (6), 837–847.
- BUI, Q. (2007): Wastewater management in Nam Dinh, Viet Nam. Dissertation, Universität Greifswald, Greifswald.
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ (2005): BUNDposition Klärschlamm – BUNDforderungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Einklang mit Gesundheits- und Bodenschutz. BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, HRSG., DOWNLOAD UNTER http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/sonstiges/2005_0600_sonstiges_klaerschlamm_position.pdf. (23.07.2014).
- BURIAN, S., WALSH, T., KALYANAPU, A., LARSEN, S. (2013): Climate Vulnerabilities and Adaption of Urban Water Infrastructure Systems. In: HOSSAIN, F., PIELKE, R. A., Hrsg., *Vulnerability of water resources to climate*, Elsevier/Acad. Press, Amsterdam u.a., 87–107.

- CARDOSO, L., RAMIREZ CAMPEROS, E., ESCALANTE, E. (2008): Vermicomposting Technology for Stabilizing the Sewage Sludge from Rural Waste Water Treatment Plants. *Water Practice & Technology* 3, (1).
- CEPIZA (o. J.): Can Tho Industrial Parks, Can Tho.
- CES (2009): Pre-Investment Study for Water and Wastewater Projekts in Can Tho City, Can Tho.
- CHF (1979): A handbook on appropriate technology, Ottawa, Canada.
- CIA (2014): The World Factbook – East & Southeast Asia: Vietnam.
- CIPCO (2013): Central Wastewater Treatment Plant Tra Noc - Status 10/2013, Can Tho.
- CLEMENT, F., AMEZAGA, J. (2008): Linking reforestation policies with land use change in northern Vietnam: – Why local factors matter. *Geoforum* 39, 265–277.
- DEL AGUILA JUAREZ, PEDRO, LUGO DE LA FUENTE, ROCÍO, VACA PAULÍN, R. (2011): Vermicomposting as a process to stabilize organic waste and sewage sludge as an application for soil. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14, (3), 949–963.
- DEOLALIKAR, A., MITRA, A., BHATTACHRYEE, S., CHAKRABORTY, S. (2005): Effect of vermicomposting process on metal content of paper mill solid waste. *Journal of Environmental Science & Engineering* 47, (2), 81–84.
- DICHTL, N. (1984): Die Stabilisation von Klärschlämmen unter besonderer Berücksichtigung einer zweistufigen aeroben/anaeroben Prozeßführung, Verein zur Förderung des Lehrstuhls für Wasserwirtschaft und Umwelttechnik II (Siedlungswasserwirtschaft) an der Ruhr-Univ. Bochum e.V., Bochum.
- DINH, H. T., MISHRA, D. (2013): Light manufacturing in Vietnam – creating jobs and prosperity in a middle-income economy, World Bank, Washington, DC.
- DOHANYOS, M., ZABRANSKA, J. (2001): Anaerobic Digestion. In: SPINOSA, L., VESILIND, P. A., Hrsg., *Sludge into biosolids*, IWA Publishing, London, 223–241.
- DOMÍNGUEZ, J., EDWARDS, C., WEBSTER, M. (2000): Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia andrei*. *Pedobiologia* 44, (1), 24–32.
- DRÜCKER, N. (2009): Abwasserbehandlung in Spontansiedlungen am Beispiel eines Barrios in Caracas, Venezuela, ISAH, Hannover.
- DTINEWS (26.11.2013): Workers at industrial parks in need of daycare, Download unter <http://www.talkvietnam.com/2013/11/workers-at-industrial-parks-in-need-of-daycare/>. (07.07.2014).

- DTINEWS (22.01.2014): Hundreds of workers in Can Tho strike for Tet bonuses, Download unter <http://www.talkvietnam.com/2014/01/hundreds-of-workers-in-can-tho-strike-for-tet-bonuses/>. (07.07.2014).
- DWA (1998): Personalbedarf für den Betrieb kommunaler Kläranlagen, Ges. zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef. 1998. Aufl.
- DWA (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V, Hennef. 2000. Aufl.
- DWA, HRSG. (2008): Kennwerte der Klärschlammentwässerung. DWA-Regelwerk M 383, DWA, Hennef.
- DWA, HRSG. (2010): Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. DWA-Regelwerk M 363, DWA, Hennef.
- DWA (2013): Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen (Gelbdruck), DWA, Hennef.
- DWD (2015): Durchschnittliche jährliche Niederschlagsmengen nach Bundesländern und Gesamtdeutschland, Download unter ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/regional_averages_DE/annual/precipitation/. (28.08.2015).
- EDWARDS, C., ARANCON, N. Q. (o. J.): The Science of Vermiculture: The Use of Earthworms in organic Waste Management, Download unter <http://www.slocountyworms.com/wp-content/uploads/2010/12/THE-SCIENCE-OF-VERMICULTURE.pdf>. (22.03.2015).
- EDWARDS, C., BATER, J. (1992): The use of earthworms in environmental management. *Soil Biology and Biochemistry* 24, (12), 1683–1689.
- EGYPTIEN GAD, U., KLEIN, P. (2012): Länderprofil – Vietnam, GATE Germany, Bonn.
- ELBERG JØRGENSEN, P., HOLM KRISTENSEN, G. (2005): Industrial Water and Wastewater Management Projects. In: LØHNHOLDT, J., Hrsg., *Water and wastewater management in the tropics*, IWA Publ, London, 308–363.
- ELVIRA, C., SAMPEDRO, L. (1998): Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot-scale study. *Bioresource technology : biomass, bioenergy, biowastes, conversion technologies, biotransformation, production technologies* 63, (3), 205–212.
- EPA (1983): *Process Design Manual Land Application of Municipal Sludge – Technology Transfer*, Eigenverlag, Washington.
- EUWID WASSER UND ABWASSER (2012): Vietnam will bessere Ver- und Entsorgung. *EUWID Wasser und Abwasser* 32, 15.

- EWERT, W. (2006): Betriebliche Probleme durch Inkrustationen nehmen zu - Gründe und Abhilfemöglichkeiten. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. vom 29.3. - 31.3.2006 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen, 61/1-61/14.
- FACH, S. (2013): Bewertung der Abwasserbehandlung in Entwicklungs- und Schwellenländern, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Verlag Siedlungswasserwirtschaft, Karlsruhe.
- FELDE, D. VON, STASKE, S., WILMS, R., SCHMITT, F. (2006): Co-Vergärung von Fettabscheiderrückständen in Faulbehältern kommunaler Kläranlagen. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. vom 29.3. - 31.3.2006 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- FISCHEDICK, M., ELLENBECK, T. (2004): Innovative Technologien für Entwicklungsländer: – Aktuelle Ansätze zur Energie-, Trinkwasser- und Nahrungsbereitstellung, Wuppertal.
- FNR (2010): Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung, Gülzow-Prüzen. 5. Aufl.
- FÖRSTNER, U. (2012): Umweltschutztechnik, Springer, Berlin u.a.
- FRAKO POWER SYSTEMS (o. J.): Effiziente, sichere und nachhaltige Systeme zur Energieerzeugung - Blockheizkraftwerke von franko power systems, Download unter <http://www.frakopowersystems.de/>. (23.06.2014).
- FREHNER, W. (2008): Social transformation - Strukturwandel in Vietnam.
- FRISCHKNECHT, P. M., SCHMIED, B. (2002): Umgang mit Umweltsystemen – Methodik zum Bearbeiten von Umweltproblemen unter Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsgedankens, Ökom-Verl, München.
- GARG, P., GUPTA, A., SATYA, S. (2006): Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: a comparative study. *Bioresource Technology* 97, (3), 391–395.
- GARSCHAGEN, M., DIEZ, J., NHAN, D., KRAAS, F. (2012): Socio-Economic Development in the Mekong Delta – Between the Prospects of Progress and the Realms of Reality. In: RENAUD, F. G., KUENZER, C., Hrsg., *The Mekong delta system. Interdisciplinary analyses of a river Delta*, Springer, Dordrecht u.a., 83–132.
- GAVALA, H. N., YENAL, U. (2003): Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water research : a journal of the International Water Association* 37, (19), 4561–4572.
- GHAZY, M. R. M. (2011): Sustainable sewage sludge management in Egypt based on life cycle assessment, Techn. Univ., Ges. zur Förderung des Inst. für Siedlungswasserwirtschaft, Braunschweig.

- GISI, U. (1997): Bodenökologie – 56 Tabellen, Thieme, Stuttgart. 2. Aufl.
- GLADEBECK, M. (2014): Klimadiagramm Cần Thơ, Download unter <http://www.mappedplanet.com/klima/klimadiagramm-5354-C%E1%BA%A7n+Th%C6%A1,Vietnam>. (05.08.2014).
- GÖDECKE, D. (2004): Natürliche Verfahren der Schlammmentwässerung – Konventionelle und neue Verfahren -, Magdeburg, Download unter http://www.schlammvererdung.de/downloads/Vortrag_nat_Schlammmentwaesserung_Version%2020040520.pdf. (21.11.2014).
- GÓMEZ, X., CUETOS, M., CARA, J., MORÁN, A., GARCÍA, A. (2006): Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. *Renewable Energy* 31, (12), 2017–2024.
- GROßHEIM, M. (2014): Wirtschaft & Entwicklung - Das LänderInformationsPortal der GIZ, Download unter <http://liportal.giz.de/vietnam/wirtschaft-entwicklung/>. (01.08.2014).
- GSO (2013): Area, population and population density in 2013 by province. GENERAL STATISTICS OFFICE OF VIETNAM, HRSG., Hanoi, Download unter http://www.gso.gov.vn/default_en.aspx?tabid=467&idmid=3&ItemID=15751. (18.02.2015).
- GTZ (2006): Instrumente zur AkteursAnalyse – 10 Bausteine für die partizipative Gestaltung von Kooperationssystemen, Eschborn.
- GUJER, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft – mit 84 Tabellen, Springer, Berlin u.a.
- GUONG, V., HOA, N. (2012): Aquaculture and Agricultural Production in the Mekong Delta and its Effects on Nutrient Pollution of Soil and Water. In: RENAUD, F. G., KUENZER, C., Hrsg., *The Mekong delta system. Interdisciplinary analyses of a river Delta*, Springer, Dordrecht u.a., 363–393.
- GUPTA, R., GARG, V. (2008): Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials* 153, (3), 1023–1030.
- HA, N., YEM, T., MAI, V. (2008): Study on reuse of heavy metal rich sludge in ceramic pigment and construction material production. *Journal of Science, Natural Sciences and Technology* 24, 280–286.
- HA, P., MCLAUGHLIN, M., OBORN, I. (2005): Nutrient recycling for sustainable agriculture in Viet Nam. In: FAO, Hrsg., *Improving plant nutrient management for better farmer livelihoods, food security and environmental sustainability. Proceedings of a Regional Workshop*, 158–165.
- HABERKERN, B. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen – Forschungsbericht 205 26 307, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

- HAMAGUCHI, N., ISHIZUKA, F. (2012): Liberalization, integration, and industrial location in Vietnam. In: INSTITUTE OF DEVELOPING ECONOMIES, Hrsg., Economic integration and the location of industries : the case of less developed East Asian countries / ed. by Ikuo Kuroiwa, Palgrave Macmillan, Basingstoke, Hampshire u.a., 43–87.
- HAUBOLD-ROSAR, M. (2007): Klärschlammeinsatz im Landschaftsbau und bei Rekultivierungsmaßnahmen. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT, Hrsg., Perspektiven der Klärschlammverwertung : Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. BMU-Expertentagung vom 6. und 7. Dezember 2006 in Bonn, KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, 124–137.
- HAUG, R. T. (1980): Compost engineering – principles and practice, Technomic, Lancaster.
- HEINSS, U., MONTANGERO, A. (2003): Kommunale Abwasserbehandlung - Fäkal-schlammbehandlung in den Tropen am Beispiel von Vererdungsbeeten. KA : Korrespondenz Abwasser, Abfall ; Organ der DWA 50, (9), 1162–1168.
- HEMA (2011): Vietnam Water and Sanitation Sector Assessment Report. HEALTH ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ADMINISTRATION, HRSG., 67 S., Download unter http://www.wpro.who.int/vietnam/topics/water_sanitation/watsan_sector_report_vietnam_2011.pdf. (04.08.2014).
- HEMALATHA, B. (2012): Vermicomposting of fruit waste and industrial sludge. International Journal of Advanced Engineering Technology 3, (3), 60–63.
- HERBST, H. B. (2008): Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- HERR, H., STACHULETZ, R., unter Mitarbeit von Jürgen Stetten (2010): Vietnam am Scheideweg - Analysen einer Ökonomie auf dem Drahtseil, Berlin.
- HINTERMAIER-ERHARD, G., ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde – Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden, Enke, Stuttgart.
- HIRSCH, G. (1995): Beziehungen zwischen Umweltforschung und disziplinärer Forschung. GAIA 4, (5-6), 302–314.
- HOFFMEISTER, W. (2008): Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse – eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen, BWV, Berliner Wiss.-Verl, Berlin, 336 S.
- HOFMANN, K. (1992): Entwässerung und Vererdung von Klärschlamm in Schilfbeeten, Tübingen.

- HOSPIDO, A., MOREIRA, M. (2004): LCA Case Studies - Environmental Performance of a Municipal Wastewater Treatment Plant. The international journal of life cycle assessment : associated journal of UNEP/SETAC Life Cycle Initiative ; official organ of JLCA (LCA Society of Japan), ISLCA (Indian Society for LCA), KSLCA (Korean Society for LCA) and ALCAS (Australian LCA Society) 9, (4), 261–271.
- HOSSAIN, F. (2013): Vulnerability of Water Resources to Climate. In: HOSSAIN, F., PIELKE, R. A., Hrsg., Vulnerability of water resources to climate, Elsevier/Acad. Press, Amsterdam u.a., 1–2.
- HÜBNER-SCHMID, K., BORRIES, B. VON, HASEMANN, A. (2003): Netzwerk- und Akteursanalyse – Ein Methodischer Leitfaden, Bonn.
- HUNG, N., DELGADO, J., TRI, V., LE HUNG, M., MERZ, B., BÁRDOSSY, A., APEL, H. (2012): Floodplain hydrology of the Mekong Delta, Vietnam. Hydrological Processes 26, (5), 674–686.
- HUNG, Y.-T., HAWUMBA, J., WANG, L. K. (2010): Living Machines. In: WANG, L. K., HUNG, Y.-T., Hrsg., Environmental Bioengineering, Springer Science Business Media, LLC, Totowa, NJ, 743–772.
- INSTITUTE OF CHEMICAL INDUSTRY VIETNAM (2012): Report of Wastewater Management Status in the Industrial Zone of Tra Noc 1 & 2, Hanoi.
- IPP CONSULT, G. (2008): Case study of sustainable sanitation projects: Humification of sewage sludge El-Minia and Nawaq, Egypt – Draft.
- IRIN (2009): VIETNAM: Even bottled water unsafe. IRIN, HRSG., Hanoi, Download unter <http://www.irinnews.org/report/83965/vietnam-even-bottled-water-unsafe>. (04.08.2014).
- JIMENEZ, B., BARRIOS, J., MENDEZ, J., DIAZ, J. (2004): Sustainable sludge management in developing countries. Water science and technology / the International Association on Water Quality 49, (10), 251–258.
- JOHNSON, O., NAPIAH, M., KAMARUDDIN, I. (2014): Potential uses of Waste Sludge in Construction Industry: A Review. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8, (4), 565–570.
- JORDAN, R. (2006): Vegetative Behandlung anaerob stabilisierter Klärschlämme. Dissertation, Braunschweig.
- KALDERIS, D., AIVALIOTI, M., GIDARAKOS, E. (2010): Options for sustainable sewage sludge management in small wastewater treatment plants on islands: The case of Crete. Desalination 260, (1-3), 211–217.
- KATKAR, P. (2010): Coconut coir fibre shows growing potential for construction. Technical textiles international : TT international 19, (8), 37–44.

- KEDING, M., LANGENOHL, T., WITTE, H. (1994): Stoffliche Verwertung von Klärschlamm und klärschlammhaltigen Produkten im Landschaftsbau. Entsorgungspraxis : EP ; Technik-Magazin für die Abfallwirtschaft 12, (7-8), 56–65.
- KHOA, L., HO, P. (2006): Greening Through Industrial Relocation in Vietnam – The Case of Ho Chi Minh City. In: Ho, P., Hrsg., Greening industries in newly industrializing economies. Asian-style leapfrogging, Kegan Paul, London u.a., 107–135.
- KHOI, B., VAN TRI, M. (2003): Fertilizer recommendations for sustainable production of orchard fruit in the South of Vietnam. FOOD & FERTILIZER TECHNOLOGY CENTER, HRSG., Taipei, Download unter <http://www.ffc.agnet.org/library.php?func=view&style=type&id=20110802102314>. (04.10.2014).
- KHWAIRAKPAM, M., BHARGAVA, R. (2009): Vermitechnology for sewage sludge recycling. Journal of Hazardous Materials 161, (2-3), 948–954.
- KLINGEL, F., MONTANGERO, A., KONÉ, D., STRAUSS, M. (2002): Fecal Sludge Management in Developing Countries – A planning manual, Duebendorf.
- KLINGEL, F., MONTANGERO, A., STRAUSS, M. (2001): Nam Dinh - Planning for Improved Faecal Sludge Management and Treatment. EAWAG/SANDEC, HRSG., Hanoi, Download unter http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/ewm/dl/WSA_paper_Klingel.pdf. (04.08.2014).
- KOOTTATEP, T., SURINKUL, N., KAMAL, A., POLPRASERT, C., MONTANGERO, A., DOULAYE, K., STRAUSS, M. (2004a): Material fluxes in constructed wetlands treating septage and their polishing systems. In: IWA, Hrsg., Proceedings, 9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control and 6th International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds, France.
- KOOTTATEP, T., SURINKUL, N., POLPRASERT, C., KAMAL, A., KONÉ, D., MONTANGERO, A., HEINSS, U., STRAUSS, M. (2004b): Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate - Lessons learnt after seven years of operation. EAWAG, HRSG., DOWNLOAD UNTER http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KOOTTATEP%20et%20al%202005%20Treatment%20of%20Septage%20in%20Constructed%20Wetlands%20in%20Tropical%20Climate.pdf.
- KOPP, J. (2006): Neue Verfahren zur Verbesserung der Klärschlammmentwässerung. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. vom 29.3. - 31.3.2006 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- KOPP, J., DICHTL, N. (2001): Sludge Production and Characterization. In: SPINOSA, L., VESILIND, P. A., Hrsg., Sludge into biosolids, IWA Publishing, London, 19–39.
- KRAUS, J. (2003): Herstellung von Leichtzuschlagstoffen aus Klärschlamm, ISWW, Karlsruhe.

- KRAUS, J., HAHN, H. (2004a): KLÄRSCHLAMM-VERWERTUNG - Möglichkeiten der stofflichen Verwertung von Klärschlämmen in der Bauindustrie - Teil 1: Einsatz in der Asphalt-, Ziegel- und Zementindustrie. Müll und Abfall : Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft 36, (7), 333–340.
- KRAUS, J., HAHN, H. (2004b): KLÄRSCHLAMM-VERWERTUNG - Möglichkeiten der stofflichen Verwertung von Klärschlämmen in der Bauindustrie . Teil II: Herstellung von Leichtzuschlagstoffen. Müll und Abfall : Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft 36, (8), 378–387.
- KRESSE, A., KÖNEMANN, R., LAHMEYER, W., LINSEN, K., NEUSCHÄFER, U., RIPKE, H., SCHARNAGL, C., SCHNITKER, W., VOCKS, A. (2010): DWA-Arbeitsbericht – Leitfaden zur Klärschlamm Entsorgung, Hennef.
- KROGMANN, U. (2001): Composting. In: SPINOSA, L., VESILIND, P. A., Hrsg., Sludge into biosolids, IWA Publishing, London, 259–277.
- KUHLENDahl, R., BREITHAUPT, K. (2011): Kärschlammvererdung auf Norderney – Seit 20 Jahren wird der Klärschlamm von Norderney vererdet. Die "Insellösung" hat sich bewährt. wwt, (10), 8–12.
- LAFITTE-TROUQUE, S., FORSTER, C. (2002): The use of ultrasound and gamma-irradiation as pre-treatments for the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures. Bioresource Technology 84, (2), 113–118.
- LAMPERT, C., TESAR, M., THALER, P. (2011): Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle (KEVBA). UMWELTBUNDESAMT GMBH, HRSG., Wien, Download unter <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0353.pdf>.
- LAN, P. (2013): Vietnam will die Entwicklung seiner Industrie forcieren. Export Manager, (4), 10–11.
- LATIFF, A., KARIM, A., RIDZUAN, M., YEOH, D., HUNG, Y.-T. (2010): Heavy Metal Removal by Crops from Land Application of Sludge. In: WANG, L. K., HUNG, Y.-T., Hrsg., Environmental Bioengineering, Springer Science Business Media, LLC, Totowa, NJ, 211–232.
- LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen – (KVR-Leitlinien), Kulturbuchverlag, Berlin.
- LE HUNG, A. (2003): Untersuchungen zur Verwertung der Biomasse in Landwirtschaft und Gartenbau Vietnams unter besonderer Berücksichtigung der Kompostierung. Dissertation, Humboldt Universität Berlin, Berlin.
- LEBLANC, R., MATTHEWS, P., RICHARD, R. (2008): Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management – Moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi, Kenya.

- LESER, H. (1997): Diercke-Wörterbuch Allgemeine Geographie, Westermann u.a., Braunschweig u.a.
- LHL (2012): Nährstoffgehalt organischer Düngemittel. LANDESBETRIEB HESSISCHES LANDESLABOR, HRSG., DOWNLOAD UNTER [http://www.llh.hessen.de/downloads/landwirtschaft/pflanzenproduktion/wirtschaftsduenger/N%C3%A4hrstoffgehalte%20organischer%20D%C3%BCngemittel%20\(Dezember%202012\).pdf](http://www.llh.hessen.de/downloads/landwirtschaft/pflanzenproduktion/wirtschaftsduenger/N%C3%A4hrstoffgehalte%20organischer%20D%C3%BCngemittel%20(Dezember%202012).pdf). (05.09.2015).
- LIÉNARD, A., DUCHÈNE, P. (1995): A study of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds. *Water science and technology* 32, (3), 251–262.
- LIER, J., TILCHE, A. (2001): Anaerobic digestion - New perspectives in anaerobic digestion. *Water science and technology* 43, (1), 1–18.
- LIN, J.-G., CHANG, C.-N. (1997): Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization. *Bioresource technology : biomass, bioenergy, biowastes, conversion technologies, biotransformation, production technologies* 62, (3), 85–90.
- LINDTNER, S. (2008): Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen. LEBENS MINISTERIUM, HRSG., Wien.
- LOUVEN, E. (1982): Technologietransfer und angepasste Technologien – zum Beschäftigungsproblem in Entwicklungsländern, Erdmann, Tübingen.
- LWL NRW (2014): Mittlere Nährstoffgehalte organischer Dünger. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, HRSG., DOWNLOAD UNTER <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/naehrstoffgehalte-organischer-duenger.pdf>. (05.09.2015).
- MAESENEER, J. DE (1997): Constructed wetlands for sludge dewatering. *Water science and technology* 35, (5), 279–285.
- MATTHEWS, P. (2001): Agricultural and other land uses. In: SPINOSA, L., VESILIND, P. A., Hrsg., *Sludge into biosolids*, IWA Publishing, London, 43–73.
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, Fischer, Jena.
- MEYER-KOHLSTOCK, D., KRAFT, E. (2013): Energieeffizienz von Kompost-Anlagen und der Co-Vergärung auf Kläranlagen – Steigerung der Energieeffizienz bei der Verwertung biogener Reststoffe ; Abschlussbericht zum Teilprojekt, Weimar.
- MIERKE, A. (2012): Wirtschaftsstandort Vietnam – 10 Gründe für eine Investition in Vietnam und die 10 größten Herausforderungen für internationale Investoren, Hanoi, Freiburg.

- MOL, A. (2009): Environmental governance through information: China and Vietnam. *Singapore Journal of Tropical Geography* 30, (1), 114–129.
- MoNRE (2009): Environmental Status Report.
- MoNRE (2012): 4000 tons of sludge at biggest waste treatment plant has nowhere to go. VIETNAM ASSOCIATION FOR CONSERVATION OF NATURE AND ENVIRONMENT, HRSG., Hanoi, Download unter <http://www.vacne.org.vn/4000-tons-of-sludge-at-biggest-waste-treatment-plant-has-nowhere-to-go/e1704.html>. (25.08.2014).
- MÜLLER, E. (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, NRW, Düsseldorf, 369 S.
- MÜLLER, E., THOMMEN, R., STÄHLI, P. (1994): Energie in ARA – Energiesparmaßnahmen in Abwasserreinigungsanlagen ; Handbuch, Eidg. Dr.-Sachen- und Materialzentrale, Bern.
- NAH, I., KANG, Y., HWANG, K.-Y., SONG, W.-K. (2000): Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process. *Water Research* 34, (8), 2362–2368.
- NDEGWA, P., THOMPSON, S. (2000): Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology* 75, (1), 7–12.
- NDEGWA, P., THOMPSON, S., DAS, K. (2000): Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology* 71, (1), 5–12.
- NEBIKER, J. H. (1965): Die Trocknung des Klärschlammes durch Verdunstung – Untersuchungen über die Verdunstungsvorgänge auf Schlamm-trockenbeeten. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 27, (2), 273–367.
- NG, W. (2006): Industrial wastewater treatment, Imperial College Press u.a., London.
- NGA, B., GIAO, N., NU, P. (2008): Effects of Wastewater from Tra Noc Industrial Zone on adjacent Rivers in Can Tho City. *Vietnam Scientific Journal*, (9), 194–201.
- NGOC, U., SCHNITZER, H. (2009): Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste management* 29, (6), 1982–1995.
- NGUYEN, H., HEAVEN, S., BANKS, C. (2014): Energy potential from the anaerobic digestion of food waste in municipal solid waste stream of urban areas in Vietnam. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 5, (4), 365–374.
- NGUYEN, T. (2010a): Legal Framework of the Water Sector in Vietnam, Bonn.
- NGUYEN, T. (2010b): Problems of Law Enforcement in Vietnam: The Case of Wastewater Management in Can Tho City, Bonn.
- NGUYEN, T. (2012a): Fertilizer Sector – Persistence amid Oversupply. SAIGON SECURITIES INC., HRSG., Ho Chi Minh Stadt, Download unter <http://www.stoxplus.com/download.asp?id=3465>. (08.01.2015).

- NGUYEN, V. (2012b): Promotion of Biogas Plant Application in the Mekong Delta of Vietnam. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- NGUYEN, X., LE, H. (2011): Solid Waste Management in Mekong Delta. *Journal of Vietnamese Environment* 1, (1), 27–33.
- NHAN DAN ONLINE (2014): UNDP hails Vietnam's environmental sustainability, Hanoi, Download unter <http://en.nhandan.org.vn/scitech/environment/item/2278102-undp-hails-vietnam%E2%80%99s-environmental-sustainability.html>. (25.08.2014).
- NIELSEN, S. (2011): Sludge treatment reed bed facilities organic load and operation problems. *Water science and technology* 63, (5), 942–949.
- NOVAK, J. (2001): Dewatering. In: SPINOSA, L., VESILIND, P. A., Hrsg., *Sludge into biosolids*, IWA Publishing, London, 339–363.
- NOVAK, J., SADLER, M., MURTHY, S. (2003): Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids. *Water Research* 37, (13), 3136–3144.
- NUSCHELER, F. (2012): *Lern- und Arbeitsbuch Entwicklungspolitik*, Dietz, Bonn.
- OANDA (2014): OANDA Wechselkurse, Devisenkurse für Corporate & Finance, Download unter <http://www.oanda.com/lang/de/rates/>. (28.01.2015).
- OBARSKA-PEMPKOWIAK, H., TUSZYNSKA, A. (2003): Polish experience with sewage sludge dewatering in reed systems. *Water science and technology* 48, (5), 111–118.
- OLIVEIRA, A. DA, BOCIO, A., TREVILATO, TANIA M BELTRAMINI, TAKAYANAGUI, ANGELA M MAGOSSO, DOMINGO, J., SEGURA-MUNOZ, S. (2007): Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological wastewater treatment plant. *Environmental science and pollution research international* 14, (7), 483–489.
- ORHON, D., BABUNA, F. (2009): *Industrial wastewater treatment by activated sludge*, IWA Publ, London u.a.
- ORTH, H. (2006): Anforderungen an die Abwassertechnik in ausgewählten Entwicklungs- und Schwellenländern. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. vom 29.3. - 31.3.2006 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- ORTH, H., GRUBE, S., TSERASHCHUK, M. (2010): Bemessungs- und Betriebsparameter des Belebungsverfahrens in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und stofflichen Eigenschaften. In: RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, Hrsg., *Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern*, Ruhr-Univ., Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Bochum, 11–22.

- OTTERPOHL, R., BUZIE, C. (2013): Treatment of the solid fraction. In: LARSEN, T. A. et al., Hrsg., Source separation and decentralization for wastewater management, IWA Publishing, London, 259–273.
- OZAKI, H., CO, T., LE, A., PHAM, V., VAN NGUYEN, B., TARAO, M., NGUYEN, H., LE, V., NGUYEN, H., SAGEHASHI, M., NINOMIYA-LIM, S., GOMI, T., HOSOMI, M., TAKADA, H. (2014): Human factors and tidal influences on water quality of an urban river in Can Tho, a major city of the Mekong Delta, Vietnam. Environmental monitoring and assessment 186, (2), 845–858.
- PABSCH, H. (2004): Batch humification of sewage sludge in grass beds, Cuvillier, Göttingen.
- PASQUALINO, J., MENESES, M. (2011): The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal. Journal of food engineering : an international journal 103, (4), 357–366.
- PAULY, U., BLAU, S. (1997): Zehn Jahre Klärschlammvererdung in Schilfbeeten - Neue Wege der Klärschlammverarbeitung und -verwertung. Korrespondenz Abwasser : KA ; Informationsbl. für d. Abwasserwesen ; Wasser, Abwasser, Abfall 44, (10), 1812–1823.
- PHA, T., VAN MINH, D., VAN, D., LE DUC (2014): Growth and Absorbance of Heavy Metals of Reed Plants (*Phragmites australis*) in Soil after Mineral Mining in Thai Nguyen Province of Vietnam. Journal of Agricultural and Biological Science 9, (8), 264–269.
- PHILIPP, W. (1988): Untersuchungen über den Einsatz von Pflanzen zur Klärschlamm-Entwässerung – Teilvorhaben 2 - Seuchenhygienische Untersuchungen, Hohenheim.
- PHONG, L., STOORVOGEL, J., VAN MENSVOORT, M. E. F., UDO, H. M. J. (2011): Modeling the soil nutrient balance of integrated agriculture-aquaculture systems in the Mekong Delta, Vietnam. Nutr Cycl Agroecosyst 90, (1), 33–49.
- POGADE, F., SCHARFE, C. (2012): Aufbau und Beratung von Abwasserbetrieben in Vietnam – Ein Erfahrungsbericht. Korrespondenz Abwasser, Abfall ; Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V 59, (8), 744–747.
- POSCH, A., KLINGSPIEGL, M. (2012): Stoff- und Energiebilanzierung in der industriellen Produktion. In: TSCHANDL, M., POSCH, A., Hrsg., Integriertes Umweltcontrolling. Von der Stoffstromanalyse zum Bewertungs- und Informationssystem, Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, 53–67.
- RAWLINSON, S., SKALSKA-BURGESS, M. (2013): International Construction Cost Report – A Change of Pace.
- REINHOFFER, M. (1998): Klärschlammvererdung mit Schilf, Inst. für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Graz.

- REMY, C., BOULESTREAU, M., LESJEAN, B. (2014): Technischer Nachweis eines innovativen Konzepts für ein energie-positives Klärwerk. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 47. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft "Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig". 19. bis 21. März 2014 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V, Aachen, 23/1-23/15.
- RENSINK, J., RULKENS, W. (1997): Using metazoa to reduce sludge production. *Water science and technology* 36, (11), 171–179.
- RESSEL, O. (2004): Entscheidungshilfen für die Planung von Anlagen zum naßmechanischen Recycling von Betonrestmassen. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- RIVERO-HERNANDEZ, R. (1991): Influence of pH on the production of *Eisenia fetida*. *Avanc. Aliment. Anim.* 31, 215–217.
- RODEWALD-RUDESCU, L. (1974): Das Schilfrohr – *Phragmites communis* Trinius, Schweizerbart, Stuttgart.
- RODRIGUEZ, D., DELGADO, A., DELAQUIL, P., SOHNS, A. (2013): Thirsty Energy, Washington, Download unter <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16536>. (17.04.2015).
- RUDOLPH, K.-U., FUHRMANN, T. (2010): Klärtechnik für Vietnams Industriezonen. *Wasserwirtschaft, Wassertechnik : wwt ; das Praxismagazin für das Trink- und Abwassermanagement* 2010, (9), 42–45.
- RUDOLPH, K.-U., HARBACH, M. (2010): Angepasste ökonomische Methoden. In: RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, Hrsg., Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, Ruhr-Univ., Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Bochum, 178–187.
- RUDOLPH, K.-U., KREUTER, S., GENTHE, W., PANNING, F., FRIEDRICHS, F., DONG, P., HEINRICH, R., LONG, N., THE, N. (2013): Monitoring of Indirect Industrial Dischargers – Development of a Monitoring Strategy and First Results of a Monitoring Survey in the Drainage System of Tra Noc Industrial Zone in Vietnam. *Vietnam Journal of Chemistry* 51, (2), 224–232.
- RULKENS, W., RENSINK, J., ROEST, H. VAN DER (1998): The potential for metazoa in biological wastewater treatment – Oligochaete worms in activated sludge systems may offer a way to reduce sludge volumes. *Water quality international*, 25–27.
- SANGWAN, P., KAUSHIK, C., GARG, V. (2008): Vermiconversion of industrial sludge for recycling the nutrients. *Bioresource Technology* 99, (18), 8699–8704.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Spektrum Akad. Verl, Heidelberg. 15. Aufl.

- SCHINDLER, W. (2012): Adsorptionskältemaschinen auf dem Vormarsch – Standardanwendungen beweisen ihre Praxistauglichkeit. Sonderausgabe Großkältetechnik. Kälte Klima Aktuell.
- SCHOLL, W., WURSTER, H., THALMANN, A., MÖLLER, J. (1985): Klärschlammvererdung in Schilfbecken - Ergebnisse und Erkenntnisse eines praxisbezogenen Pilotprojekts. KA : Korrespondenz Abwasser, Abfall ; Organ der DWA 32, (5), 386–395.
- SCHUH, H. (2001): Entscheidungsverfahren zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN, HRSG., Dresden, Download unter <http://www.econbiz.de/archiv/dd/tudd/umwelt/entscheidungsverfahren.pdf>. (06.08.2014).
- SCHULENBURG, H. G. (2012): Potentials and limitations of energy recovery from municipal solid waste in Vietnam, Eigenverl. des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., Pirna.
- SCHWEIGHOFER, P. (1994): Möglichkeiten der Plausibilitätsprüfung von Messdaten. In: KROISS, H., Hrsg., Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz. ÖWAV-Seminar, Wien, 23. Februar 1994, IWAG, Wien.
- SEBESVARI, Z., LE, HUONG THI THU, VAN TOAN, P., ARNOLD, U., RENAUD, F. G. (2012): Agriculture and Water Quality in the Vietnamese Mekong Delta. In: RENAUD, F. G., KUENZER, C., Hrsg., The Mekong delta system. Interdisciplinary analyses of a river Delta, Springer, Dordrecht u.a., 331–361.
- SELIVANOVSKAYA, S., ZARIPOVA, S., LATYPOVA, V., HUNG, Y.-T. (2010): Treatment and Disposal of Biosolids. In: WANG, L. K., HUNG, Y.-T., Hrsg., Environmental Bioengineering, Springer Science Business Media, LLC, Totowa, NJ.
- SHAK, K., WU, T., LIM, S., LEE, C. (2014): Sustainable reuse of rice residues as feedstocks in vermicomposting for organic fertilizer production. Environmental science and pollution research international 21, (2), 1349–1359.
- SHAMMAS, N., WANG, L. K. (2007a): Biosolids Composting. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ, 645–687.
- SHAMMAS, N., WANG, L. K. (2007b): Characteristics and Quantity of Biosolids. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ, 1–44.
- SHAMMAS, N., WANG, L. K. (2007c): Land Application of Biosolids. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ, 705–745.
- SHAMMAS, N., WANG, L. K. (2008): Process Selection of Biosolids Management Systems. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids engineering and management, Humana Press, Totowa, NJ, 691–743.

- SHIBISTOVA, O., TISCHER, S., BINH, V., VIEN, D., GUONG, V., GUGGENBERGER, G. (2009): Effects of substrate application to alluvial soils on soil microbial parameters at a rambutan (*Nephelium lappaceum*) orchard, Closing Nutrient Cycles in Decentralised Water Treatment Systems in the Mekong Delta. SANSED-Project Final Report, Bonn, 186–194.
- SHIVAKUMAR, C., MAHAJANASHETTI, S., MURTHY, C., BASAVARAJA, H., HAWALDAR, Y. (2009): Production and marketing of vermicompost in Dharwad district : An economic analysis. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 22, (4), 850–853.
- SINHA, R., HERAT, S., BHARAMBE, G., BRAHAMBHATT, A. (2010): Vermistabilization of sewage sludge (biosolids) by earthworms: converting a potential biohazard destined for landfill disposal into a pathogen-free, nutritive and safe biofertilizer for farms. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 28, (10), 872–881.
- SINHA, R. K., HERAT, S., VALANI, BRIJAL K. SONI, CHANDRAN, V. (2011): Earthworms - the waste managers – their role in sustainable waste management converting waste into resource while reducing greenhouse gases, Nova Science Publ., New York, NY.
- SLADE, S. (1994): Goal-based decision making: an interpersonal model, Erlbaum, Hillsdale, NJ. 1. Aufl.
- SONG, Y.-C., KWON, S.-J. (2004): Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water research : a journal of the International Water Association* 38, (7), 1653–1662.
- SPERLING, M., CHERNICHARO, CARLOS AUGUSTO DE LEMOS (2005a): Biological wastewater treatment in warm climate regions, IWA u.a., London.
- SPERLING, M., CHERNICHARO, CARLOS AUGUSTO DE LEMOS (2005b): Biological wastewater treatment in warm climate regions, IWA u.a., London.
- SPRINGER, C. (2009): Kompostierung - Energieeffizienz - Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen verschiedener Kompostierungssysteme - Kompostierung . CO₂-Äquivalent . Energie . Energieverbrauch. *Müll und Abfall : Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft* 41, (11), 564–572.
- SPRINGER, C. (2010): Kompost Energie und CO₂ — Bilanz der Kompostierung unter Einbezug des Substitutionspotentials des Komposts. *Müll und Abfall : Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft* 42, (8), 386–397.
- SPRINGER, C. (2011): Energie- und CO₂-Bilanz von Kompostierungsanlagen - die Basis für einen Effizienzpass, Rhombos-Verl., Berlin.

- STATISTISCHES BUNDESAMT (2010): Umwelt: Abwasserbehandlung – Klärschlamm – Ergebnisbericht, Wiesbaden.
- STEG, L., VLEK, C. (2010): Social Science and Environmentatl Behaviour. In: BOERSEMA, J. J., REIJNDERS, L., Hrsg., Principles of environmental sciences, Springer, Dordrecht u.a., 97–141.
- STEINKE, M. (2010): Untersuchungen zur Behandlung von Abwässern der Fischverarbeitungsindustrie, Univ., Agrar- und Umweltwiss. Fak., Rostock.
- STREBEL, H. (1992): Material- und Energiebilanzen. UmweltWirtschaftsForum 1, 9–15.
- STRUSZCZYK, M. H. (2000): Herstellung von Chitosan und einige Anwendungen. Dissertation, Universität Potsdam, Potsdam.
- SUNTZE LIFESCIENCE CO., LTD (2008): Phuong Duy Company, Can Tho, Download unter <http://www.phuongduy.com.vn/index.php?page=detailsProduct&id=25>. (28.02.2015).
- SUSANA (2008): Mehr Nachhaltigkeit bei Sanitärversorgungs-Konzepten.
- TARICKSKA, J., LONG, D., CHEN, J., HUNG, Y.-T., ZOU, S.-W. (2007): Anaerobic Digestion. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ, 135–176.
- TCHOBANOGLOUS, G. (2003): Wastewater Engineering – Treatment and Reuse, McGraw-Hill, Boston, Mass. 4. Aufl.
- THAI, N. (2009): Hazardous industrial waste management in Vietnam: – current status and future direction. Journal of Material Cycles and Waste Management, (11), 258–262.
- THANH, N., MATSUI, Y. (2011): Municipal Solid Waste Management in Vietnam – Status and the Strategic Actions. International Journal of Environmental Research 5, (2), 285–296.
- THE GLOBAL ECONOMY (2013): Vietnam Realzinssatz - Daten, Diagramm. THE GLOBAL ECONOMY, HRSG., DOWNLOAD UNTER http://de.theglobaleconomy.com/Vietnam/Real_interest_rate/. (27.06.2015).
- TOT, B., STANISAVLJEVI, N., BATINIĆ, B., ŽIVAN, M., VUJIĆ, G.: Forthcoming Sewage Sludge Issue in Developing Countries.
- TRANSPARENCY INTERNATIONAL E.V. (2015): Country Profiles, Download unter <http://www.transparency.org/country>. (05.03.2015).
- TRAUTMANN, N. (2015): Energieeffizienz der anaeroben Abwasserbehandlung am Beispiel der Hefe- und Fischindustrie, ISAH, Hannover.

- TRI, V. (2012): Hydrology and Hydraulic Infrastructure Systems in the Mekong Delta, Vietnam. In: RENAUD, F. G., KUENZER, C., Hrsg., The Mekong delta system. Interdisciplinary analyses of a river Delta, Springer, Dordrecht u.a., 49–81.
- TRINH, L., DUONG, C., VAN DER STEEN, PETER, LENS, P. (2013): Exploring the potential for wastewater reuse in agriculture as a climate change adaptation measure for Can Tho City, Vietnam. *Agricultural Water Management* 128, 43–54.
- TROLL, C., PAFFEN, K. (1964): Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde.
- TRUNG, T., PHUONG, P. (2012): Bioactive Compounds from By-Products of Shrimp Processing Industry in Vietnam. *Journal of Food and Drug Analysis* 20, (1), 194–197.
- TURK, T., KERN, M. (2008): Bioabfallkompostierung - Wirtschaftliche Bewertung von Vergärungsanlagen als Vorschaltanlagen vor der Bioabfallkompostierung. *Müll und Abfall : Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft* 40, (2), 60–67.
- TUROVSKIY, I. S., MATHAI, P. (2006): Wastewater sludge processing, Wiley, Hoboken, NJ.
- UN (1987): Report of the World Commission on Environment and Development – Our Common Future.
- UN (2014): The Millenium Development Goals Report 2014, New York.
- VAN NES, W. J. (2006): Asia hits the gas – Biogas from anaerobic digestion rolls out across Asia. *Renewable Energy World*, (1), 102–111.
- VAN TOAN, N. (2009): Production of Chitin and Chitosan from Partially Autolyzed Shrimp Shell Materials. *The Open Biomaterials Journal* 1, 21–24.
- VD OFFICE (2013): Press Review. VD OFFICE FOR WATER AND SUSTAINABILITY RESEARCH, HRSG., Hanoi, Download unter <http://www.vd-office.net/publications.de.html>. (25.08.2014).
- VIEN, T. (2008): Forestland management policies in Vietnam: – An Overview. CARES, HRSG., Hanoi, 13 S., Download unter <http://www.cares.org.vn/webplus/Article/Forestland%20management%20policies%20in%20VietNam%20An%20Overview.pdf>. (26.01.2015).
- VIET, N., DIEU, TRAN THI MY, LOAN, NGUYEN THI PHUONG (2013): Current Status of Sludge Collection, Transportation and Treatment in Ho Chi Minh City. *Journal of Environmental Protection* 04, (12), 1329–1335.
- VIETNAM LAW & LEGAL FORUM (2014): CAN THO CITY seeks investment to tap tourism potential, Download unter <http://vietnamlawmagazine.vn/news/can-tho-city-seeks-investment-to-tap-tourism-potential/9199f443-e18f-47ea-9b63-06b3b4e87cef.html>. (28.03.2015).

- VINACHEM (2010): Vietnam's Fertilizer Market Update – Overview, Download unter http://www.vinachem.com.vn/Desktop.aspx/News-EN/Market-and-product/Vietnams_Fertilizer_Market_Update/. (08.01.2015).
- VNS (2014): Environmental laws necessary. VEITNAM NEWS ONLINE, HRSG., Hanoi, Download unter <http://vietnamnews.vn/opinion/253169/environmental-laws-necessary.html>. (25.08.2014).
- VÖCKLINGHAUS, S., KLUG, S., HILLENBRAND, T., HIESSL, H., FLORES, C., WEILANDT, M., LANGE, M. (2012): NAUWA - Fokusthema – Akteursanalyse, Karlsruhe, Essen, Düsseldorf.
- VORLAUFER, K. (2011): Südostasien, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- VOSS, K., KOSSMANN, W. (2012): Chancen am Mekong. BIOGAS Journal, (4), 94–101.
- VPBS (2014): Vietnam Food & Beverage Industry.
- WAGNER, M., GÜNKEL, T. (2010): Belüftungssysteme in kalten und warmen Klimaten. In: RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, Hrsg., Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, Ruhr-Univ., Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Bochum, 23–32.
- WAIBEL, G., BENEDIKTER, S., REIS, N., GENSHICK, S. (2012): Water Governance Under Renovation? – Concepts and Practices of IWRM in the Mekong Delta, Vietnam. In: RENAUD, F. G., KUENZER, C., Hrsg., The Mekong delta system. Interdisciplinary analyses of a river Delta, Springer, Dordrecht u.a., 167–198.
- WANG, L. K., HUNG, Y.-T., Hrsg. (2010): Environmental Bioengineering, Springer Science Business Media, LLC, Totowa, NJ.
- WANG, L. K., HUNG, Y.-T., LI, K. (2007a): Vermicomposting Process. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ, 689–704.
- WANG, L. K., LI, Y., SHAMMAS, N., SKELLAROPOULOS, G. (2007b): Drying Beds. In: WANG, L. K., Hrsg., Biosolids treatment processes, Humana Press, Totowa, NJ.
- WEF (2008): Industrial wastewater management, treatment, and disposal, WEF Press u.a., Alexandria. 3. Aufl.
- WEF, HRSG. (2012): Solids process design and management, McGraw-Hill, New York u.a.
- WENDLAND, C. (2008): Anaerobic digestion of blackwater and kitchen refuse, Ges. zur Förderung und Entwicklung der Umwelttechnologien an der Technischen Univ. Hamburg-Harburg, Hamburg.

- WHO (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater – Wastewater and excreta use in aquaculture, World Health Organization, Geneva, XVIII, 140 S.
- WIECHMANN, B., DIENEMANN, C., KABBE, C., BRANDT, S., VOGEL, I., ROSKOSCH, A. (2012): Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Dessau-Roßlau.
- WIENEKE, F. (2005): Acceptance Analysis of New Technology for Sustainable Water Management and Sanitation – A Case Study of Operating Farm Households in the Mekong Delta, Viet Nam. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- WILDERER, P. (2006): Strategien zur Lösung der Wasserprobleme in Schwellen- und Entwicklungsländern. In: PINNEKAMP, J., Hrsg., 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. vom 29.3. - 31.3.2006 in der Messe Essen Ost, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- WINTER, A. (2003): Desintegrationsverfahren zur Intensivierung der Schlammfäulung – großtechnische Vergleiche, Braunschweig.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2014): World Weather Information Service, Download unter <http://worldweather.wmo.int/en/home.html>. (14.09.2015).
- WORLDBANK (2010): Municipal Waste Management Report: Status-quo and Issues in Southeast and East Asian Countries.
- WORLDBANK (2013): Vietnam Urban Wastewater Review – Main Report.
- WORLDBANK (2014a): Construct Centralized Effluent Treatment Plant with Capacity 1.500 m³/d at Hoa Mac Industrial Zone – Environmental Impact Assessment, Ha Nam.
- WORLDBANK (2014b): Population density (people per sq. km of land area), Download unter <http://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST>. (24.08.2015).
- WORLDBANK (2014c): Population growth (annual %) | Data | Table, Download unter <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>. (01.08.2014).
- WORLDBANK (2015): World Development Indicators – School enrollment, tertiary (% gross), Download unter <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&type=metadata&series=SE.TER.ENRR#>. (14.09.2015).
- WORLDPRESS (2011): Vietnam: Seafood industry, a year of blooming harvest, Download unter <http://qualasaexpertise.wordpress.com/2011/02/25/vietnam-seafood-industry-a-year-of-blooming-harvest/>. (06.08.2014).
- WSB (2014): Betriebsanleitung der Kläranlage, Can Tho.
- WU, D., WANG, R. (2006): Combined cooling, heating and power: A review. Progress in Energy and Combustion Science 32, (5-6), 459–495.

- YANG, J., LV, B., ZHANG, J., XING, M. (2014): Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods. *Bioresource Technology* 154, 94–100.
- ZACHER, B., HANISCH, B., PHILIPP, W., STRAUCH, D. (1987): Untersuchungen über den Einsatz von Pflanzen zur Klärschlamm-Entwässerung – Teil I: Abwassertechnische und seuchenhygienische Untersuchungen. *KA : Korrespondenz Abwasser, Abfall ; Organ der DWA* 34, (9), 922–931.
- ZANGEMEISTER, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, Wittemann, München.
- ZECH, W., SCHAD, P. (2014): Böden der Welt – ein Bildatlas, Springer Spektrum, Berlin u.a.
- ZESSNER, M., LAMPERT, C. (2010): Cost comparison of wastewater treatment in Danubian countries. *Water science and technology* 62, (2), 223–231.
- ZHANG, H., MATSUTO, T. (2011): Comparison of mass balance, energy consumption and cost of composting facilities for different types of organic waste. *Waste management* 31, (3), 416–422.

Abkürzungen und Begriffe

Elemente und Verbindungen

ATP	Adenosintriphosphat
Ca	Calcium
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CaO	Branntkalk
Cd	Cadmium
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
H bzw. H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure
Hg	Quecksilber
K	Kalium
K ₂ O	Angabe des Kaliumgehaltes (Düngemittel)
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
Mg bzw. Mg ₂	Magnesium
MgO	Angabe des Magnesiumgehaltes
Mn	Mangan
N bzw. N ₂	Stickstoff
NaOH	Natronlauge
NH ₃	Ammoniak (gasförmig)
NH ₄ ⁺	Ammonium (gelöstes Ion)
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
Ni	Nickel
O bzw. O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
P ₂ O	Angabe des Phosphorgehaltes (Düngemittel)
Pb	Blei
PO ₄ -P	Phosphatphosphor
S	Schwefel
TC	Total Carbon
TKN	Kjeldahl Nitrogen
TN	Gesamtstickstoff
TOC	Organischer Kohlenstoff
TP	Gesamtphosphor

Zn	Zink
----	------

Formelzeichen und Einheiten

a	jährlich
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
BSB bzw. BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
cm	Centimeter
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CST	Kapillare Fließzeit
d	Tag, täglich
€	Euro
E	Wirkungsgrad der Vorklärung
EUR	Euro
EW	Einwohnerwert
g	Gramm
GR	Glührückstand
GV	Glühverlust
h	Stunde, stündlich
ha	Hektar
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
kWh	Kilowattstunde
L	Liter
µm	Mikrometer
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mg	Milligramm
min.	Minuten
mm	Millimeter
MPN	Most Probable Number
MW	Megawatt
n	Anzahl
N	Nutzwert
η	Wirkungsgrad
ppm	parts per million
PS	Primärschlammmenge
Q	Volumen; Volumenstrom
TR	Trockenrückstand
aoTR	anorganischer Trockenrückstand

oTR	organischer Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
W	Watt

Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AdKM	Adsorptionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerke
BIOABFV	Bioabfallverordnung
Bo	Abkürzung für Schlammboden
bzw.	beziehungsweise
ca.	Circa
CEPIZA	Can Tho Export Processing and Industrial Zone Authority
CIA	Central Intelligence Agency
CIPCO	Can Tho Industry Zone infrastructure construction Company
CPC	Can Tho Pesticide Joint Stock Company
d. h.	das heißt
DAC	Development Assistance Committee
DoC	Department of Construction
DoF	Department of Finance
DoNRE	Department of Natural Resources and Environment
DoST	Department of Science and Technology
DPI	Department of Planning and Investment
E. coli	Escherichia Coli
etc.	et cetera
FAO	Food and Agricultural Organization of the United Nations
ggf.	Gegebenenfalls
GSO	General Statistics Office of Vietnam
GTZ	Gesellschaft für technische Zusammenarbeit
i. d. R.	in der Regel
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LF	Elektrische Leitfähigkeit
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
MoNRE	Ministry of Natural Resources and Environment
o. ä.	oder ähnliches
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
pH	pH-Wert
SABECO	The Saigon Beer, Alcohol and Beverage Corporation

UN	United Nation
US	United States
USA	United States of America
USD	United States Dollar
vgl.	vergleiche
VND	Vietnamesische Dong
WHO	World Health Organization
z. B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau des Arbeitsprogramms	4
Abbildung 2-1: Die Wasserressource in Wechselwirkung mit anderen relevanten Einflussfaktoren der Umwelt	5
Abbildung 2-2: Schlagzeilen verschiedener vietnamesischer Zeitungsartikel.....	12
Abbildung 2-3: Geografische Lage der Sozialistischen Republik Vietnam.....	15
Abbildung 2-4: Klimadiagramme der Metropolen Hanoi (1898-1990) und Ho Chi Minh Stadt (1906-1990).....	16
Abbildung 2-5: Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate der Bevölkerung und der Altersaufbau in Vietnam.....	17
Abbildung 2-6: Entwicklung der Studierendenzahlen von 1990 bis 2013	19
Abbildung 2-7: Prozentuales Wirtschaftswachstum im asiatischen Raum (1986-2010) ...	20
Abbildung 2-8: Individualverkehr und Stromversorgung in Ho Chi Minh Stadt	21
Abbildung 2-9: Aktueller Stand (2013) der kommunalen Abwasserbehandlung in Vietnam	23
Abbildung 2-10: Schlüsselregularien innerhalb des vietnamesischen Gewässerschutzes	29
Abbildung 2-11: Einflussmöglichkeiten der Akteure.....	36
Abbildung 2-12: Übersicht der aus der Situationsanalyse erarbeiteten Zielkriterien.....	40
Abbildung 2-13: Alternativen für die Behandlung und Verwertung von Industrieklärschlamm.....	42
Abbildung 2-14: Entstehung, Behandlung und Verwertung/Entsorgung von Klärschlamm.....	45
Abbildung 2-15: Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten für Industrieklärschlämme.....	56
Abbildung 2-16: Kompostierungsanlage der Kläranlage Bin Hung	60
Abbildung 2-17: Schema einer Kompostierungsanlage mit anschließender landwirtschaftlicher Verwertung	71
Abbildung 2-18: Fließschema einer Wurmkompostierungsanlage.....	72
Abbildung 2-19: Schema des Entwässerungsprozesses im Trockenbeetsystem und Trockenbeete auf der Kläranlage Bac Ninh, Vietnam	73
Abbildung 2-20: Zyklusphasen eines Klärschlammvererdungsbeetes.....	74

Abbildung 2-21: Verfahrensschema einer anaeroben Klärschlammstabilisierung	76
Abbildung 2-22: Umsetzbare Technologievarianten für die vietnamesischen Industriezonen	79
Abbildung 3-1: Geografische Lage von Can Tho und der Industriezone Tra Noc	81
Abbildung 3-2: Obst- und Gemüsemarkt in Can Tho und die neueröffnete Can Tho Brücke über den Fluss Hau	83
Abbildung 3-3: Verschmutzung eines Abwasserkanals vor der Einleitung in den Fluss Hau sowie Wellblechhäuser mit Latrinen am Can Tho Fluss	85
Abbildung 3-4: Einfahrt zur Industriezone Tra Noc, Can Tho	87
Abbildung 3-5: Systembild der funktionell miteinander verbundenen Akteure in der Industriezone Tra Noc	89
Abbildung 3-6: Zielkriterien und Indikatoren für die Industriezone Tra Noc	95
Abbildung 3-7: Prozessschema der Pangasiusverarbeitung	97
Abbildung 3-8: Belebungs- und Nachklärbecken der Kläranlage des Fischverarbeitungsbetriebes	98
Abbildung 3-9: Produktionsprozess von Glucosamin	100
Abbildung 3-10: Belebungsbecken der Kläranlage und Probenahme beim Chitinhersteller	101
Abbildung 3-11: Kläranlagenschema der Brauerei mit Schlammbehandlung	102
Abbildung 3-12: Lage und Prozessdiagramm (1. Phase) des geplanten Zentralklärwerks in der Industriezone Tra Noc	103
Abbildung 3-13: Belebungs- und Nachklärbecken des Zentralklärwerks in der Industriezone Tra Noc	104
Abbildung 3-14: Reisanbauflächen und eine Ziegelei am Ufer des Mekongs	114
Abbildung 3-15: Alternativen angepasst an die Randbedingungen in der Industriezone Tra Noc	117
Abbildung 4-1: Exemplarischer Bilanzraum	122
Abbildung 4-2: Primärenergie	124
Abbildung 4-3: Rotteboxen für die Intensivrotte mit Zwangsbelüftung	127
Abbildung 4-4: Kompostwürmer und die Wurmkompostierung in den Styroporboxen ..	128
Abbildung 4-5: Schematischer Versuchsaufbau, Versuchsfläche und Beschickung der Trocken- sowie Vererdungsbeete	129

Abbildung 4-6:	Schematischer Aufbau der anaeroben Batchtests sowie die Batchanlage im Versuchscontainer	130
Abbildung 4-7:	Schematischer Aufbau und die tägliche Beschickung der Versuchsreaktoren zur anaeroben Klärschlammstabilisierung	131
Abbildung 5-1:	Verwendetes Strukturmaterial vor und nach der Mischung mit Klärschlamm.....	138
Abbildung 5-2:	Stoffbilanz der Kompostierung mit Rindenmulch	139
Abbildung 5-3:	Temperaturentwicklung der Kompostierung über den Bilanzierungszeitraum	141
Abbildung 5-4:	Nährstoffkonzentrationen der Kompostansätze im Vergleich mit Bioabfallkompost	144
Abbildung 5-5:	Schwermetallgehalte der Kompostansätze im Vergleich mit den Grenzwerten der BIOABFV (1998).....	145
Abbildung 5-6:	Stoffstrombilanz der Wurmkompostierung.....	147
Abbildung 5-7:	Verlauf des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit	149
Abbildung 5-8:	Anfangs- und Endgehalte der Nährstoffe im Wurmkompost.....	151
Abbildung 5-9:	Stoffstrombilanz der Trockenbeete	154
Abbildung 5-10:	Stoffstrombilanz der Vererdungsbeete.....	154
Abbildung 5-11:	Austrocknung und Pflanzenbestand der Trocken- und Vererdungsbeete	157
Abbildung 5-12:	Stoffstrombilanz der anaeroben Klärschlammstabilisierung	162
Abbildung 5-13:	Spezifische Gasproduktion der sauren und alkalischen Desintegration sowie der Co-Vergärung.....	165
Abbildung 5-14:	Energiebilanz der Kompostierung.....	173
Abbildung 5-15:	Energiebilanz der Wurmkompostierung.....	175
Abbildung 5-16:	Energiebilanz der Trockenbeete	176
Abbildung 5-17:	Energiebilanz der Vererdungsbeete	177
Abbildung 5-18:	Energiebilanz der anaeroben Klärschlammstabilisierung	179
Abbildung 5-19:	Kläranlagenbestandteile einige Jahre nach der Inbetriebnahme	183
Abbildung 6-1:	Nutzwertvergleich der ausgewählten Technologievarianten der Fallbeispiele.....	198
Abbildung 6-2:	Sensitivitätsanalyse mit Varianten der Indikatorgewichtung	199

Abbildung 7-1: Unterschiedliche Aggregate zur Klärschlammmentwässerung (Bandfilterpresse und Dekanter) in Vietnam	203
Abbildung 7-2: Trockenbeete auf der Kläranlage in Bac Ninh und Wurmbeet mit eingebauter Trennwand zwischen frischem und fertigem Wurmkompost.....	204
Abbildung 7-3: Wurmkompostierungsanlage für die Fischverarbeitung	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vergleich der Einleitgrenzwerte der TCVN 5945 (2005) für industrielles Abwasser mit der QCVN 40 (2011)	27
Tabelle 2-2:	Hauptziele der Akteure und Identifikation der Schlüsselakteure	34
Tabelle 2-3:	Zusammenfassung der Umfeldanalyse und Ableitung der Zielkriterien....	38
Tabelle 2-4:	Typische Sekundärschlammproduktion für verschiedene Behandlungsverfahren	47
Tabelle 2-5:	Industrieller Abwasseranfall und Schadstofffrachten der Industriezonen in den vier Hauptwirtschaftsregionen Vietnams (2009).....	49
Tabelle 2-6:	Zusammenstellung wichtiger Parameter für die Charakterisierung von Klärschlamm.....	51
Tabelle 2-7:	Charakterisierung von kommunalen und industriellen Klärschlamm in Malaysia	53
Tabelle 2-8:	Eigenschaften und Inhaltsstoffe einiger industrieller Abwässer	54
Tabelle 2-9:	Nährstoffgehalte von organischen Düngemitteln und Klärschlamm im Vergleich zu Wirtschaftsdüngern	57
Tabelle 2-10:	Auswahlmatrix für die Verwertungs- und Entsorgungsoptionen.....	64
Tabelle 2-11:	Zentrale/dezentrale Eignung der ausgewählten Verwertungsoptionen für Vietnam	69
Tabelle 2-12:	Notwendige Behandlungsschritte und Klärschlammcharakterisierung in Bezug auf die ausgewählten Verwertungswege in Vietnam	77
Tabelle 3-1:	Zielvorstellungen der beteiligten Akteure sowie ihrer Beziehungen und Handlungsrestriktionen in der Industriezone Tra Noc	92
Tabelle 3-2:	Ermittlung der Klärschlamm-mengen anhand verschiedener Bemessungs- und Massenansätze für die ausgewählten Fallbeispiele der Industriezone Tra Noc	106
Tabelle 3-3:	Charakterisierung der Klärschlämme aus den ausgewählten Fallbeispielen der Industriezone Tra Noc im Vergleich zu landwirtschaftlich verwertetem Klärschlamm in Deutschland	107
Tabelle 3-4:	Bestimmung der Bodenklasse für die in der Provinz Can Tho vorherrschenden Fluvisole.....	111
Tabelle 4-1:	Zeitliche Systemgrenzen sowie die analysierten Parameter der untersuchten Technologievarianten	118

Tabelle 4-2:	Mischungsverhältnisse der verwendeten Strukturmaterialien sowie die Wassergehalte	126
Tabelle 4-3:	Wassergehalt zu Beginn und Ende der Wurmkompostierung.....	127
Tabelle 4-4:	Physikalische und chemische Bestimmungsmethoden	132
Tabelle 5-1:	Analysierte Nähr- und Schadstoffe im Klärschlamm der Industriezone Tra Noc	135
Tabelle 5-2:	Systemgrößen der Kompostierung	138
Tabelle 5-3:	Haupteinflussparameter der Klärschlammkompostierung.....	140
Tabelle 5-4:	Hauptparameter für die Bewertung der Kompostqualität	143
Tabelle 5-5:	Systemgrößen der Wurmkompostierung	147
Tabelle 5-6:	Optimale Bedingungen und Einflussfaktoren für die Wurmaufzucht	148
Tabelle 5-7:	Systemgrößen der Trocken- und Vererdungsbeete	153
Tabelle 5-8:	Einflussfaktoren der Trockenbeete und Klärschlammvererdung.....	155
Tabelle 5-9:	Bewertung der Nährstoffgehalte im Klärschlamm hinsichtlich Düngewirkung.....	158
Tabelle 5-10:	Systemgrößen für die anaerobe Klärschlammstabilisierung	160
Tabelle 5-11:	Einflussfaktoren der anaeroben Klärschlammstabilisierung.....	160
Tabelle 5-12:	Schlammkennwerte des Faulschlammes im Vergleich mit Richtwerten für eine gute Entwässerungsleistung	167
Tabelle 5-13:	Vergleich der Sickerwasserqualität der Trocken- und Vererdungsbeete mit der technischen Regel QCVN40:2011/BTNMT	168
Tabelle 5-14:	Faulschlammqualität der Fischverarbeitung	169
Tabelle 5-15:	Kostenvergleich der Technologievarianten für das Fallbeispiel der Fischverarbeitung	186
Tabelle 5-16:	Bau- und betriebstechnische Maßnahmen für die untersuchten Technologievarianten	187
Tabelle 6-1:	Gewichtung und Bewertung der Indikatoren des Zielsystem zur Nutzwertanalyse	193
Tabelle 6-2:	Vergleich ausgewählter Indikatoren für die Technologievarianten ...	195
Tabelle 6-3:	Nutzwertberechnung für die verschiedenen Technologievarianten..	196

Anhang

Nutzwertberechnung für das Fallbeispiel Brauerei

Systemvariante			Anaerobe Klärschlamm-stabilisierung		Kompostierung		Wurmkompostierung	
Kriterien		Gewichtung	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert
Gesundheit und Hygiene		%						
Effektivität		6,25						
1	Stabilisierungsgrad	3,125	1	0,031	1	0,031	1	0,031
2	Reduzierung der pathogenen Mikroorganismen	3,125	2	0,063	2	0,063	1	0,031
Beeinträchtigung		6,25						
3	Rückbelastung	2,5	3	0,075	1	0,025	1	0,025
4	Geruch	2,5	3	0,075	1	0,025	1	0,025
5	Emission	1,25	1	0,013	3	0,038	1	0,013
Umwelt und natürliche Ressourcen								
Zuverlässigkeit		6,25						
6	Überflutungssicher	1,25	3	0,038	3	0,038	2	0,025
7	Klima/Temperatureinfluss	5	1	0,050	1	0,050	2	0,100
Verwertung		6,25						
8	Qualität Schwermetalle	3,125	2	0,063	2	0,063	1	0,031
9	Düngewert	3,125	3	0,094	1	0,031	1	0,031
Technologie und Betrieb								
Flexibilität		10						
10	Produktionsschwankungen	4	3	0,120	1	0,040	1	0,040
11	Platzbedarf	2	1	0,020	3	0,060	2	0,040
12	Anlagengröße	4	2	0,080	1	0,040	3	0,120
Betrieb		10						
13	Bauweise	2	3	0,060	2	0,040	1	0,020
14	Maschinentechnik	4	3	0,120	2	0,080	1	0,040
15	Arbeitsaufwand	4	1	0,040	2	0,080	3	0,120
Finanzielle und ökonomische Kriterien								
Kosten		15						
16	jährliche Kosten	7,5	3	0,225	2	0,150	1	0,075
17	Nutzungsdauer	7,5	2	0,150	3	0,225	1	0,075
Ressourcen		15						
18	Einsparungen (€/a)	7,5	2	0,150	2	0,150	1	0,075
19	Energiebedarf	7,5	2	0,150	3	0,225	1	0,075
Soziale und kulturelle Kriterien								
Bildungsstand		12,5						
20	Komplexität der Technologievariante	6,25	3	0,188	2	0,125	2	0,125
21	Schulungsbedarf	6,25	3	0,188	2	0,125	1	0,063
Umsetzung		12,5						
22	Akzeptanz der Technologie	6,25	1	0,063	2	0,125	1	0,063
23	Integration Behörden/Partei	6,25	1	0,063	2	0,125	2	0,125
Auswertung								
Nutzwert			2,12		1,95		1,37	

Nutzwertberechnung für das Fallspiel des Chitosanherstellers

Systemvariante		Gewichtung		Anaerobe Klärschlamm- stabilisierung		Kompostierung		Trockenbeete		Klärschlammvererdung		Wurmkompostierung	
Kriterien		%	%	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert
Gesundheit und Hygiene													
Effektivität			10										
1	Stabilisierungsgrad			2	0,100	1	0,050	1	0,050	1	0,050	1	0,050
2	Reduzierung der pathogenen Mikroorganismen			2	0,100	2	0,100	3	0,150	3	0,150	1	0,050
Beeinträchtigung			10										
3	Rückbelastung			3	0,120	1	0,040	3	0,120	2	0,080	1	0,040
4	Geruch			3	0,090	1	0,030	3	0,090	3	0,090	1	0,030
5	Emission			1	0,030	3	0,090	2	0,060	1	0,030	1	0,030
Umwelt und natürliche Ressourcen													
Zuverlässigkeit			8										
6	Überflutungssicher			3	0,090	3	0,090	1	0,030	1	0,030	2	0,060
7	Klima/Temperatureinfluss			1	0,050	1	0,050	1	0,050	2	0,100	2	0,100
Verwertung			4,5										
8	Qualität Schwermetalle			3	0,068	2	0,045	2	0,045	2	0,045	1	0,023
9	Düngewert			2	0,045	1	0,023	1	0,023	1	0,023	3	0,068
Technologie und Betrieb													
Flexibilität			6,25										
10	Produktionsschwankungen			3	0,075	1	0,025	1	0,025	1	0,025	1	0,025
11	Platzbedarf			1	0,013	2	0,025	3	0,038	3	0,038	1	0,013
12	Anlagengröße			2	0,050	1	0,025	1	0,025	1	0,025	3	0,075
Betrieb			6,25										
13	Bauweise			3	0,038	2	0,025	1	0,013	1	0,013	1	0,013
14	Maschinenteknik			3	0,090	2	0,060	2	0,060	2	0,060	1	0,030
15	Arbeitsaufwand			1	0,030	2	0,060	2	0,060	1	0,030	3	0,090
Finanzielle und ökonomische Kriterien													
Kosten			15										
16	Jährliche Kosten			3	0,225	3	0,225	1	0,075	2	0,150	2	0,150
17	Nutzungsdauer			2	0,150	3	0,225	1	0,075	1	0,075	1	0,075
Ressourcen			15										
18	Einsparungen (€/a)			2	0,150	2	0,150	3	0,225	3	0,225	1	0,075
19	Energiebedarf			2	0,150	3	0,225	3	0,225	1	0,075	1	0,075
Soziale und kulturelle Kriterien													
Bildungsstand			12,5										
20	Komplexität der Technologievariante			3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	2	0,125
21	Schulungsbedarf			3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	1	0,063
Umsetzung			12,5										
22	Akzeptanz der Technologie			1	0,063	1	0,063	3	0,188	2	0,125	1	0,063
23	Integration Behörden/Partei			1	0,063	2	0,125	3	0,188	3	0,188	2	0,125
Auswertung													
Nutzwert					2,16		2,00		1,94		1,75		1,45

Nutzwertberechnung für das Fallbeispiel Zentralklärwerk

Systemvariante				Anaerobe Klärschlamm-stabilisierung		Kompostierung		Trockenbeete		Klärschlammverwertung		Wurmkompostierung	
Kriterien		Gewichtung		Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert	Rang	Teilnutzwert
Gesundheit und Hygiene													
Effektivität													
1	Stabilisierungsgrad		3,125	1	0,031	1	0,031	2	0,063	1	0,031	1	0,031
2	Reduzierung der pathogenen Mikroorganismen		3,125	2	0,063	2	0,063	3	0,094	3	0,094	1	0,031
Beeinträchtigung													
3	Rückbelastung		2,25	3	0,068	1	0,023	2	0,045	2	0,045	1	0,023
4	Geruch		2	3	0,060	1	0,020	3	0,060	3	0,060	1	0,020
5	Emission		2	1	0,020	3	0,060	2	0,040	1	0,020	1	0,020
Umwelt und natürliche Ressourcen													
Zuverlässigkeit													
6	Überflutungssicher		3	3	0,090	3	0,090	1	0,030	1	0,030	2	0,060
7	Klima/Temperatureinfluss		5	1	0,050	1	0,050	1	0,050	2	0,100	2	0,100
Verwertung													
8	Qualität Schwermetalle		2,25	3	0,068	2	0,045	2	0,045	2	0,045	1	0,023
9	Düngewert		2,25	2	0,045	1	0,023	3	0,068	2	0,045	2	0,045
Technologie und Betrieb													
Flexibilität													
10	Produktionsschwankungen		1,25	1	0,013	1	0,013	1	0,013	1	0,013	1	0,013
11	Platzbedarf		7,5	1	0,075	2	0,150	3	0,225	3	0,225	2	0,150
12	Anlagengröße		1,25	2	0,025	1	0,013	1	0,013	1	0,013	3	0,038
Betrieb													
13	Bauweise		2	3	0,060	2	0,040	1	0,020	1	0,020	1	0,020
14	Maschinenteknik		4	3	0,120	2	0,080	2	0,080	2	0,080	1	0,040
15	Arbeitsaufwand		4	1	0,040	2	0,080	2	0,080	1	0,040	3	0,120
Finanzielle und ökonomische Kriterien													
Kosten													
16	Jährliche Kosten		7,5	3	0,225	2	0,150	2	0,150	1	0,075	2	0,150
17	Nutzungsdauer		7,5	2	0,150	3	0,225	1	0,075	1	0,075	1	0,075
Ressourcen													
18	Einsparungen (€/a)		7,5	2	0,150	2	0,150	3	0,225	3	0,225	1	0,075
19	Energiebedarf		7,5	2	0,150	3	0,225	3	0,225	1	0,075	1	0,075
Soziale und kulturelle Kriterien													
Bildungsstand													
20	Komplexität der Technologievariante		6,25	3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	2	0,125
21	Schulungsbedarf		6,25	3	0,188	2	0,125	1	0,063	1	0,063	1	0,063
Umsetzung													
22	Akzeptanz der Technologie		6,25	1	0,063	1	0,063	3	0,188	2	0,125	2	0,125
23	Integration Behörden/Partei		6,25	1	0,063	2	0,125	3	0,188	3	0,188	2	0,125
Auswertung													
Nutzwert					2,00		1,97		2,10		1,75		1,55

Veröffentlichungen

des Instituts für Stadtbauwesen, Abt. Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig

Heft 1*	R. Kayser Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen (1967)	
Heft 2	E. Zingler Die Filtration von Abwasserschlämmen – Grundlagen und Modellversuche (1969)	13,- Euro
Heft 6*	E. Zingler Die Filtration von Abwasserschlämmen II – Die Übertragbarkeit von Laboratoriumsergebnissen auf den technischen Betrieb (1970)	
Heft 15	J. Knoch Untersuchung und biologische Reinigung von Sickerwasser aus Mülldeponien (1974)	13,- Euro
Heft 19*	FESTSCHRIFT FÜR HEINRICH HABEKOST Teil 2: Siedlungswasserwirtschaft (1976)	
Heft 21*	R. Stegmann Auswertung und Prognose von Gewässergütedaten, dargestellt am Beispiel von Meßwerten der Oker und ihrer Nebenflüsse (1976)	13,- Euro
Heft 23	K. Korn Metallgehalte im Sickerwasser von Mülldeponien Ergebnisse von zweijährigen Untersuchungen an 14 Deponien (1977)	13,- Euro
Heft 25*	D. Bahrs Konditionieren von Abwasserschlämmen durch Gefrieren (1978)	
Heft 26*	H.-J. Ehrig Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien (1978) zweite erweiterte Auflage (1980)	
Heft 27*	R. Stegmann Reinigung und Verregnen von Müllsickerwasser unter Betriebsbedingungen - dargestellt am Beispiel der Deponie Venneberg/Lingen (1979)	
Heft 28*	W. Walther Beitrag zur Gewässerbelastung durch rein ackerbaulich genutzte Gebiete mit Lössböden (1979)	
Heft 29*	ASPEKTE DES STADTBAUWESENS zum 70. Geburtstag von Heinrich Habekost Teil B: Siedlungswasserwirtschaft	
Heft 33	Gas- und Wasserhaushalt von Mülldeponien INTERNATIONALE FACHTAGUNG (29.09.-01.10.1982) in Braunschweig	20,- Euro
Heft 34*	Anthropogene Einflüsse auf die Grundwasserbeschaffenheit in Niedersachsen, Fallstudien 1982 TAGUNG (14.-15. Oktober 1982) in Braunschweig	
Heft 35*	G. Ermel Stickstoffentfernung in einstufigen Belebungsanlagen – Steuerung der Denitrifikation (1983)	
Heft 38	Ablagerung umweltbelastender Stoffe Fachseminar 06.-07. Februar 1985 in Braunschweig	20,- Euro
Heft 39*	Sickerwasser aus Mülldeponien – Einflüsse und Behandlung – Fachtagung 21.-22. März 1985 in Braunschweig	20,- Euro
Heft 40	W. Walther, B. Scheffer und B. Teichgräber Ergebnisse langjähriger Lysimeter-, Drän- und Saugkerzen-Versuche zur Stickstoffauswaschung bei landbaulich genutzten Böden und Bedeutung für die Belastung des Grundwassers (1985)	15,- Euro
Heft 41	H.-J. Ehrig Weitergehende Reinigung von Sickerwässern aus Abfalldeponien (1987)	20,- Euro
Heft 42*	Biologische Stickstoff- und Phosphorelimination in Abwasserreinigungsanlagen Weiterbildungsseminar 26.-27. März 1987 in Braunschweig	

Nach Abtrennung der Abt. Siedlungswasserwirtschaft vom Institut für Stadtbauwesen wird die Reihe ab Heft 43 weitergeführt als:

Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig

Heft 43*	Rashed M. Y. Al-Sa'ed Untersuchungen zur Nitrifikation von Abwässern mit hohen Ammoniumgehalten in Belebungsanlagen Investigations on nitrification process of ammonium-rich wastewater in single-stage activated sludge systems Braunschweig (1987)	
Heft 44*	Artur Mennerich Beitrag zur anaerob-aeroben Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien (1988)	
Heft 45*	Burkhard Teichgräber Zur Nitrifikation von Abwässern mit geringer Säurekapazität (1988)	
Heft 46	Reiner Boll Zur erhöhten biologischen Phosphorentfernung mit dem Belevungsverfahren (1988)	20,- Euro
Heft 47	R. Kayser, Ch. Wolffson (Herausgeber) Kläranlagen zur Stickstoff- und Phosphorelimination Weiterbildungsseminar 16.-17. März 1989	20,- Euro
Heft 48*	W. Walther (Herausgeber) Grundwasserbeschaffenheit in Niedersachsen – Diffuser Nitrateintrag, Fallstudien Weiterbildungsseminar, 21.-22. Februar 1990	
Heft 49	Henning Albers Zur biologischen Reinigung von Sickerwasser aus Sonderabfalldeponien (1991)	20,- Euro
Heft 50	Rolf Kayser (Herausgeber) Vergleich verschiedener Bemessungsansätze zur Stickstoffelimination und Garantien für Belüftungseinrichtungen - Fachtagung 09.-10. September 1991	20,- Euro
Heft 50 E	Rolf Kayser (Editor) Workshop Nitrogen Removal and Aeration Guarantees, September 9 and 10, 1991 (Englische Originalbeiträge)	15,- Euro
Heft 51	Heribert Dernbach Nutzung von Deponiegas mit hohem HKW-Gehalt und Möglichkeiten der Behandlung (1991)	20,- Euro
Heft 52	Christian Wolffson Denitrifikation von speziellen Abwässern mit externen Kohlenstoffquellen (1992)	20,- Euro
Heft 53	Michael Werner Deponiegas zur Denitrifikation von Sickerwasser aus Mülldeponien (1993)	20,- Euro
Heft 54	Klaus Kruse Langfristiges Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien (1994)	20,- Euro
Heft 55	Joseph Hölscher Stickstoffbilanz für ein durch Kiesgewinnung gestörtes Grundwasser in einem Wassereinzugsgebiet (1994)	20,- Euro
Heft 56	Gösta Ladiges Expertensysteme für Kläranlagen unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoffelimination in einstufigen Belebungsanlagen (1994)	20,- Euro
Heft 57	Thomas Teichfischer Der Einfluß schwankender Abwasserzusammensetzungen auf die vermehrte biologische Phosphatelimination und Möglichkeiten zur Prozessstabilisierung (1994)	20,- Euro
Heft 58	Hartmut Wicht N ₂ O-Emissionen durch den Betrieb biologischer Kläranlagen (1996)	20,- Euro
Heft 59	Thomas Nellenschulte Modell zur Charakterisierung des Entwässerungsergebnisses von Klärschlämmen (1996)	20,- Euro
Heft 60	Bernd Zacharias Biologische Stickstoffelimination hemmstoffbelasteter Abwässer am Beispiel eines Eisenhüttenwerks (1996)	20,- Euro
Heft 61	J. Müller, N. Dichtl, J. Schwedes (Herausgeber) Klärschlammdeintegration – Forschung und Anwendung Fachtagung 10./11. März 1998	20,- Euro
Heft 62	Liendel Chang Auslegung von einstufigen Belebungsanlagen zur Stickstoffelimination bei Sickerwässern aus Siedlungsabfalldeponien (1998)	20,- Euro
Heft 63	Martin Steensen Chemische Oxidation und biologische Nachreinigung zur weitergehenden Sickerwasserbehandlung (1998)	20,- Euro

Heft 64	Thomas Dockhorn CSB-Elimination in Abhängigkeit vom Typ des Belebungsbeckens (1999)	20,- Euro
Heft 65	Franziska Gromadecki Anwendungsorientierte Betriebsoptimierung von Sickerwasserreinigungs- anlagen (2000)	20,- Euro
Heft 66*	Julia Kopp Wasseranteile in Klärschlammuspensionen – Messmethode und Praxis- relevanz – (2001)	20,- Euro
Heft 67	Lars Keudel Bestimmung des Absetzverhaltens von belebtem Schlamm zur Bemessung von Kläranla- gen nach dem Sequencing Batch Reactor (SBR)-Verfahren (2002)	20,- Euro
Heft 68	Markus Engelhart Anaerober Abbau mechanisch desintegrierten Überschussschlammes (2002)	20,- Euro
Heft 69	Rolf Kloss Vergleich von Verfahren und Reaktoren zur anaeroben Behandlung von Substraten mit hohem Anteil an groben suspendierten Feststoffen (2002)	20,- Euro
Heft 70	Anke Winter Desintegrationsverfahren zur Intensivierung der Schlammfäulung – Großtechnische Vergleiche – (2003)	20,- Euro
Heft 71	Matthias Wittenberg Stoffstromanalyse und Bewertung von Umweltschutzmaßnahmen am Beispiel der Abwasserwirtschaft eines Automobilwerks (2003)	20,- Euro
Heft 72*	Uwe Moshage Rheologie kommunaler Klärschlämme - Messmethoden und Praxisrelevanz - (2004)	20,- Euro
Heft 73	Rayko Jordan Vegetative Behandlung anaerob stabiler Klärschlämme (2005)	20,- Euro
Heft 74	Thomas Dockhorn Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der kommunalen Abwasserwirtschaft (2007)	20,- Euro
Heft 75	Samir Naser Hag Ibrahim Structure, Function and Formation of Anaerobic Granular Sludge (2008)	20,- Euro
Heft 76	Stefanie Wolter Untersuchungen zur Substratabhängigkeit des heterotrophen Ertragskoeffizienten (2009)	20,- Euro
Heft 77	2. Internationales Symposium Abwasserrecycling 04. - 06.11.2009 "Abwasserrecycling – Chancen und Risiken" Tagungsband	20,- Euro
Heft 78	Kai Klinksieg Charakterisierung des Absetzverhaltens von kommunalen Klärschlämmen mit Hilfe rheologischer Messungen (2010)	20,- Euro
Heft 79	Lars Günther Großtechnische Nährstoffrückgewinnung und Schadstoffausschleusung aus kommunalen Klärschlämmen (2011)	20,- Euro
Heft 80	Mohamed Rabie Mohamed Ghazy Sustainable Sewage Sludge Management in Egypt Based on Life Cycle Assessment (2011)	20,- Euro
Heft 81	3. Internationales Symposium Abwasserrecycling 21. - 22.11.2011 "Re-Water Braunschweig" Tagungsband (2011)	20,- Euro
Heft 82	Katrin Bauerfeld Einfluss klimatischer Randbedingungen auf die Klärschlammbehandlung (2012)	20,- Euro
Heft 83	Timur Esemien Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Nährstoffrückge- winnung aus Klärschlamm (2012)	20,- Euro
Heft 84	4th International Symposium "Re-Water Braunschweig" –Quality, Reuse, Global Aspects, 06. - 07.11.2013 Conference Proceedings (2013)	20,- Euro
Heft 85	Daniel Klein Untersuchung und Bewertung von Verfahren zur Stickstoff- und Phosphorrückgewinnung innerhalb des Gesamtsystems aus Abwasserreinigung, Nährstoffrecycling und Landwirt- schaft (2014)	20,- Euro
Heft 86	Xin Wu Entfernung von Microcystin-LR und ausgewählten Arzneimitteln mit biologisch aktiven Fil- tern (2014)	20,- Euro
Heft 87	5th International Symposium „RE-WATER Braunschweig“, Integrated Concepts, 02. – 03.11.2015 Conference Proceedings (2015)	20,- Euro
Heft 88	Helen Feldhaus Klärschlammbehandlungskonzepte für Industriezonen am Beispiel Vietnams (2016)	20,- Euro

*) vergriffen

**Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft
der Technischen Universität Braunschweig**

Heft 88

**Herausgeber:
Gesellschaft zur Förderung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft
an der Technischen Universität Braunschweig e.V.**

This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.